

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Gediminas MIKALAUSKAS

STIPRIŲ MAGNETINIŲ LAUKŲ SISTEMOMS
TAIKOMŲ MIKROKOMPOZITINIŲ VARIO IR
NIOBIO LAIDININKŲ SUVIRINAMUMO IR
SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (T 008)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2020

Disertacija rengta 2015–2020 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Nikolaj VIŠNIAKOV (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

doc. dr. Justinas GARGASAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008).

Nariai:

prof. dr. Oleg DEVOINO (Baltarusijos nacionalinis technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008),

doc. dr. Irmantas GEDZEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008),

dr. Rasa KANDROTAITĖ JANUTIENĖ (Kauno technologijos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008),

prof. dr. Voitech STANKEVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fizika – N 002).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2020 m. rugpjūčio 24 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto Senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2020 m. liepos 23 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2020-025-M mokslo literatūros knyga

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Gediminas MIKALAUSKAS

INVESTIGATION OF WELDED JOINTS AND
WELDABILITY OF MICROCOMPOSITE
COPPER-NIOBIUM CONDUCTORS FOR
THE APPLICATION IN HIGH MAGNETIC
FIELD SYSTEMS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (T 008)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2020

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2015–2020.

Scientific supervisor

Assoc. Prof. Dr Nikolaj VIŠNIAKOV (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Assoc. Prof. Dr Justinas GARGASAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

Members:

Prof. Dr Oleg DEVOINO (Belarusian National Technical University, Materials Engineering – T 008),

Assoc. Prof. Dr Irmantas GEDZEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Dr Rasa KANDROTAITĖ JANUTIENĖ (Kaunas University of Technology, Materials Engineering – T 008),

Prof. Dr Voitech STANKEVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Physics – N 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 24 August 2020.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 23 July 2020.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjami stiprių magnetinių laukų sistemų konstrukcijos, šiuolaikinių Cu-Nb laidininkų struktūros ypatumai ir savybės, mikrokompozitinių laidininkų gamybos specifiškai ir taikymo sritys, jų sujungimo problemos bei taikytinos sujungimo technologijos, analizuojama suvirintų keturiais specialiais metodais Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko virintinių jungčių struktūra, stipruminės ir elektrinės savybės. Disertacijos tikslas – nustatyti Cu-Nb laidininkų suvirinimo būdų ir jų parametrų poveikį gaunamų virintinių jungčių mikrostruktūrai, mechaninėms ir elektrinėms savybėms. Tyrimais siekiama išspręsti vieną svarbiausių problemų stiprių magnetinių laukų sistemose parengiant laidininkų sujungimo technologiją ir sukuriant elektrokontaktinių jungčių reikalavimus atitinkančias mikrokompozitinių laidininkų neardomas elektrokontaktines jungtis.

Siūlomi sprendimai padės spręsti egzistuojančių ir kuriamų impulsinių magnetinių sistemų, pramoninių indukcinų sistemų, naujos kartos levitacinio transporto ir aukštos įtampos elektros linijų šiuolaikinių Cu-Nb laidininkų elektrokontaktinių jungčių gamybos ir jų patikimumo problemas, leis taupyti gamybos laiką ir ekonominius išteklius dėl sumažėjusio technologinių ir techninės priežiūros operacijų kiekio, lyginant su tradiciniais ardomų elektrokontaktinių jungčių gamybos metodais. Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra. Pirmajame skyriuje apžvelgiami impulsinių magnetų ir jų sudedamųjų egzistuojančios konstrukcijos, nagrinėjami Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų gamybos būdai, šių laidininkų struktūra ir savybės, jų suvirinimo techninės galimybės, analizuojama suvirinimo procesų specifiškai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos literatūros apžvalgos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje aprašomos darbe naudotos medžiagos ir technologiniai ir tyrimo įrenginiai, darbe taikomi struktūros ir savybių tyrimo metodai, eksperimentų metodika, suvirinimo technologija ir medžiagų parinkimo metodika, pagrindinių parametrų skaičiavimo metodika. Trečiajame skyriuje pateikiami virintinių jungčių mikrostruktūros, fazinės sudėties tyrimų, mechaninių savybių, elektrinių savybių tyrimų ir suvirinimo parametrų skaičiavimo ir šių duomenų analizės rezultatai. Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai, tyrimų rezultatai pristatyti 10 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

The dissertation deals with the design of strong magnetic field systems, structural features and properties of modern Cu-Nb conductors, production specifics and applications of microcomposite conductors, their connection problems and applicable connection technologies, structure of welded joints of Cu-Nb microcomposite conductor welded by four special methods, strength and electrical properties. The aim of dissertation – to determine the effect of Cu-Nb conductor welding methods and their parameters on the microstructure of welded joints, mechanical and electrical properties. The research aims to solve one of the important problems in strong magnetic field systems by developing conductor joining technology and by creating non-destructive electro-contact joints of microcomposite conductors that meet the requirements of electric contacts.

The proposed solutions will help to solve the problems of production and reliability of existing and developed pulsed magnetic systems, industrial induction systems, next-generation levitation vehicles and modern Cu-Nb conductors of high-voltage power lines, will save production time and economic resources due to reduced number of technological and maintenance operations, compared to traditional methods of producing destructive electrocontact joints. The introductory chapter discusses the research problem, the relevance of the work, describes the object of research, formulates the aim and objectives of the work, describes the research methodology, scientific novelty of the work, the practical significance of the results, defended statements. At the end of the introduction, the author's publications and conference papers on the topic of the dissertation and the structure of the dissertation are presented. The first chapter reviews the existing structures of pulsed magnets and their components, examines the production methods of Cu-Nb microcomposite conductors, the structure and properties of these conductors, their technical possibilities of welding, analyzes the specifics of welding processes. At the end of the chapter, the conclusions of the literature review are formulated and the tasks of the dissertation are specified. The second chapter describes the materials used in the work and technological and research equipment, the methods of structure and properties research used in the work, experimental methodology, welding technology and material selection methodology, the methodology of calculating the main parameters. The third chapter presents the results of microstructure, phase composition studies, mechanical properties, electrical properties studies and calculation of welding parameters and analysis of these data. 7 articles on the topic of the dissertation have been published, and the research results have been presented at 10 scientific conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

A – pailgėjimas, mm;
 HV – kietis pagal Vikersą;
 R_e – tempimo bandymo takumo riba, MPa;
 R_m – tempimo bandymo stiprumo riba, MPa;
 R – elektinė varža, Ω ;
 T – temperatūra, $^{\circ}\text{C}$;
 T – magnetinio lauko srauto tankis, tesla (T).

Santrumpos

EDS – energijos dispersinė spektroskopija (angl. *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*);
FEM – baigtinių elementų metodas (angl. *Finite element method*);
IACS – tarptautinis atkaitinto vario standartas (angl. *International Annealed Copper Standard*);
MSR – mechaniškai inicijuojama spontaninė reakcija (angl. *mechanically induced self-propagating reaction*);

SEM – skenuojamoji elektroninė mikroskopija (angl. *scanning electron microscopy*);

SHS – spontaninė aukštatemperatūrinė sintezė (angl. *self-propagating high-temperature syntesis*);

XRD – rentgeno spindulių difrakcija (angl. *X-ray diffraction*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika.....	3
Darbo mokslinis naujumas.....	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	5
 1. STIPRIŲ MAGNETINIŲ LAUKŲ SISTEMŲ KONSTRUKCIJŲ, MIKROKOM- POZITINIŲ LAIDININKŲ BEI SUVIRINIMO PROCESŲ YPATUMŲ ANALIZĖ ...	7
1.1. Impulsiniai magnetai	7
1.2. Stiprių magnetinių laukų impulsinių magnetų konstrukciniai ypatumai	9
1.3. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų struktūra, savybės ir taikymo sritys	11
1.4. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų gamybos ypatumai.....	13
1.5. Suvirinimo būdų pritaikomumo ir specifikos apžvalga.....	15
1.5.1. Termitinio suvirinimo ypatumai.....	15
1.5.2. Lazerinio suvirinimo ypatumai	20
1.5.3. Elektronpluoščio suvirinimo ypatumai	23

1.5.4. Suvirinimas impulsiniu magnetiniu lauku.....	24
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	25
2. VARIO IR NIOBIO MIKROKOMPOZITINIŲ LAIDININKŲ NEARDOMŲ JUNGČIŲ SUJUNGIMO METODIKA, DARBE TAIKOMI TYRIMO METODAI IR MEDŽIAGOS	27
2.1. Naudojami mikrokompozitiniai laidininkai	27
2.2. Termitinio suvirinimo metodika ir medžiagos	28
2.3. Lazerinio suvirinimo metodika ir medžiagos	31
2.3.1. Medžiagos ir naudojama lazerinė įranga.....	31
2.3.2. Lazerinio suvirinimo režimų skaičiavimo metodika	33
2.4. Elektronpluoščio suvirinimo metodika	36
2.5. Slėginio suvirinimo stipriu magnetiniu lauku metodika ir medžiagos	41
2.6. Virintinių jungčių savybių analizės metodikos	42
2.6.1. Optinės mikroskopijos metodika.....	42
2.6.2. Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos metodika.....	43
2.6.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizės metodika	43
2.6.4. Jungčių stipruminių savybių analizė	44
2.6.5. Jungčių elektrinių savybių tyrimų metodika	44
2.6.6. Jungčių neardomosios kontrolės metodika.....	46
2.7. Antrojo skyriaus išvados	46
3. VARIO IR NIOBIO MIKROKOMPOZITINIŲ LAIDININKŲ VIRINTINIŲ JUNGČIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI IR MIKROSTRUKTŪROS ANALIZĖ	49
3.1. Termitinio mišinio sudėties įtakos suvirinimo jungčių struktūrai ir savybėms tyrimo rezultatai	49
3.2. Lazerinio suvirinimo technologinių parametrų įtakos virintinių jungčių struktūrai ir savybėms tyrimo rezultatai	56
3.3. Elektronpluoščio suvirinimo technologinių parametrų įtakos virintinių jungčių struktūrai ir savybėms tyrimo rezultatai	64
3.4. Slėginis suvirinimas impulsiniu magnetiniu lauku	70
3.5. Įvairiais suvirinimo būdais suvirintų jungčių pagrindinių charakteristikų palyginimas	73
3.6. Trečio skyriaus išvados	75
BENDROSIOS IŠVADOS	77
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	79
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ...	87
SUMMARY IN ENGLISH.....	89

PRIEDAI ¹	105
A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	107
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo disertacijoje.....	108
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	117

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
The relevance of the thesis.....	2
The object of research.....	2
The aim of the thesis	2
The objectives of the thesis	2
Research methodology	3
The scientific novelty of the thesis.....	3
The practical value of the research findings.....	3
The defended statments.....	4
The approval of the research findings	4
The structure of the dissertation	5
 1. THE ANALYSIS OF HIGH MAGNETIC FIELD SYSTEMS CONSTRUCTIONS, MICROCOMPOSITE CONDUCTORS AND PECULIARITIES OF WELDING PROCESSES	7
1.1. Pulse magnets.....	7
1.2. Structural features of pulsed magnets with strong magnetic fields	9
1.3. Structure, properties and applications of Cu-Nb microcomposite conductors	11
1.4. Peculiarities of Cu-Nb microcomposite conductor production	13
1.5. Overview of applicability and specifics of welding methods.....	15

1.5.1. Peculiarities of thermite welding.....	15
1.5.2. Peculiarities of laser welding	20
1.5.3. Peculiarities of electron beam welding	23
1.5.4. Pulsed magnetic field welding	24
1.6. The conclusions of the first chapter and formulation of the objectives of dissertation	25
2. COPPER-NIOBIUM MICROCOMPOSITE CONDUCTORS NON-DESTRUCTIVE JOINING METHODOLOGY, TEST METHODS AND MATERIALS USED IN THE WORK	27
2.1. Used microcomposite conductors	27
2.2. Thermite welding methodology and materials	28
2.3. Laser welding methodology and materials.....	31
2.3.1. Used materials and laser equipment.....	31
2.3.2. Methodology of laser welding regimes calculation.....	33
2.4. Methodology of electron beam welding.....	36
2.5. Methodology and materials of pressing by pulse magnetic field	41
2.6. Methods of analysis of joint properties	42
2.6.1. Methodology of optical microscopy	42
2.6.2. Methodology of scanning electron microscopy	43
2.6.3. Methodology of X-ray diffraction analysis	43
2.6.4. Analysis of joint strength properties	44
2.6.5. Methodology of research of electrical properties of joints.....	44
2.6.6. Methodology for non-destructive testing of joints	46
2.7. The conclusion of the second chapter	46
3. INVESTIGATION OF PROPERTIES AND ANALYSIS OF STRUCTURE OF WELDED JOINTS OF COPPER-NIOBIUM MICROCOMPOSITE CONDUCTORS	49
3.1. Test results of impact of thermite mixture composition on structure of welded joints and properties	49
3.2. Test results of impact of laser welding process parameters to welded joints structure and properties	56
3.3. Test results of impact of electron-beam welding process parameters to welding joints structure and properties	64
3.4. Pressure welding with pulse magnetic field	70
3.5. Comparison of main properties of joints welded using various welding methods	73
3.6. The conclusion of the third chapter	75
GENERAL CONCLUSIONS	77
REFERENCES	79

THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	87
SUMMARY IN ENGLISH.....	89
ANNEXES ¹	105
Annex A. Author`s declaration of academic integrity	107
Annex B. Co-authors agreements to provide published material in the doctoral dissertation.....	108
Annex C. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	117

¹ The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Stiprių magnetinių laukų sistemos plačiai taikomos fundamentiniams ir taikomiesiems tyrimams įvairiose mokslo šakose ir pramonėje. Tokomakai, stelaratoriai, superlaidūs magnetai, didysis hadronų greitintuvas (LHC) CERN laboratorijoje, ITER reaktorius, levitacinės sistemos yra vieni iš žinomiausių tokių magnetinių sistemų pavyzdžių. Visų šių magnetinių sistemų svarbiausiu komponentu yra induktorius (solenoidas). Rekordinis magnetinis laukas jau siekia 100 T. Tokio stipraus magnetinio lauko sukūrimui jau nepakanka vien tik tobulinti solenoidų konstrukciją. Tradicinės solenoiduose taikomos elektrotechninės medžiagos ir laidininkai jau negali atlaikyti didžiulių mechaninių ir temperatūrinių apkrovų, todėl jas keičia visiškai naujos kompozitinės medžiagos, tarp kurių Cu-Nb mikrokompozitiniai laidininkai. Šie laidininkai pasižymi unikalia struktūra, puikiomis mechaninėmis savybėmis ir geru elektriniu laidumu. Bet viena iš svarbių neišspręstų problemų stiprių magnetinių laukų sistemose lieka patikimų neardomųjų jungčių ir jų patikimų sujungimo technologijų sukūrimas. Dauguma tokių magnetų konstrukcijų turi būti neardomos pradėjus jų eksploatavimą, o jų konstrukcijoje iki šiol laidininkų sujungimui taikomos tik

ardomos, deja, praktikoje dideliu patikimumu nepasižyminčios varžtinės arba lituotos jungtys.

Darbo aktualumas

Darbo rezultatai yra svarbūs sprendžiant sukurtų ir kuriamų impulsinių magnetinių sistemų, pramoninių indukcinų sistemų, naujos kartos levitacinio transporto ir aukštos įtampos elektros linijų šiuolaikinių Cu-Nb laidininkų elektrokontaktinių jungčių gamybos technologijų ir jų patikimumo problemas.

Tyrimų objektas

Mikrokompozitinio Cu-Nb laidininko jungtys, gautos termitiniu, lazeriniu, elektronpluoščiu ir slėginiu suvirinimo būdais.

Darbo tikslas

Nustatyti termitinio, lazerinio, elektronpluoščio ir slėginio suvirinimo būdų ir jų parametrų poveikį Cu-Nb laidininko virintinių jungčių mikrostruktūrai, mechaninėms ir elektrinėms savybėms.

Darbo uždaviniai

Norint pasiekti darbo tikslą, reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Išnagrinėti Cu-Nb laidininkų struktūros ir savybių ypatumus, kurie turi įtakos suvirinimui. Išnagrinėti techninių sistemų, kai taikomi Cu-Nb laidininkai, techninius ir eksploataavimo sąlygų ypatumus, kurie lemia virintinių jungčių eksploatacines charakteristikas.
2. Parinkti Cu-Nb laidininkų tinkamas suvirinimo technologijas, apskaičiuoti ar parinkti optimalius suvirinimo technologinius parametrus. Parinkti pridėtinių medžiagų sudėtį arba sukurti būtinas pridėtines medžiagas norint gauti technologiškai kokybiškas ir patikimas neardomas jungtis. Atlikti Cu-Nb laidininkų sujungimą skirtingais suvirinimo metodais, panaudojant parinktus suvirinimo parametrus ir medžiagas.
3. Parengti virintinių jungčių tyrimo metodiką, kuri apima elektrinių ir mechaninių savybių bei mikrostruktūros tyrimus, įvertinti gautų

virintinių jungčių kokybę ir struktūrą, svarbiausias eksploatacines (elektrines ir mechanines) savybes. Palyginti skirtingais būdais gautų virintinių jungčių struktūrą, savybes ir atrinkti geresnę sujungimo technologiją.

Tyrimų metodika

Disertacijoje taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Cu-Nb laidininkų bandiniai buvo sujungti įvairiais specialiais metodais (termitinis suvirinimas, lazerinis suvirinimas, elektronpluoštis suvirinimas, slėginis suvirinimas stipriu magnetiniu lauku). Jungčių struktūra buvo įvertinama naudojant įvairius šiuolaikinius tyrimo metodus: skenuojamąją elektroninę mikroskopiją, rentgeno mikroanalizę, rentgeno spindulių difrakciją. Jungties kokybė nustatyta naudojant skaitmeninę rentgeno spindulių neardomąją kontrolę. Virintinių jungčių savybės buvo vertinamos atliekant mechaninių ir elektrinių savybių bandymus.

Darbo mokslinis naujumas

1. Gautos naujos žinios apie Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų, jungčių struktūros formavimosi ypatumus, taikant termitinio, lazerinio, elektronpluoščio ir suvirinimo stipriu magnetiniu lauku būdus, leidžiančios valdyti mechanines ir elektrines elektrokontaktinės Cu-Nb laidininkų jungties savybes optimaliame diapazone.
2. Nustatyta optimali termitinio mišinio sudėtis, užtikrinanti adiabatine termitinės reakcijos temperatūrą apie 2470 °C, optimalią amorfinio-kristalinio (anortito) šlako sudėtį ir Cu-Nb laidininko jungties kietojo Cu tirpalo ir dispersinės Fe fazės smulkiagrūdę mikrostruktūrą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Eksperimentinių tyrimų rezultatais patvirtinta, kad naujos kartos mikrokompozitinių Cu-Nb laidininkų suvirinimas yra techniškai įmanomas, pasiūlytos sujungimo technologijos taikytinos impulsinių magnetinių sistemų Cu-Nb laidininkų elektrokontaktinių jungčių sujungimui.

2. Siūloni technologiniai sprendimai leis pagerinti stiprių magnetinių laukų sistemų ir jų komponentų Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų elektrokontaktinių jungčių mechanines ir elektrines savybes, mažinti šių laidininkų sujungimo darbų sudėtingumą ir kainą.

Ginamieji teiginiai

Sukurtas (82 % Cu_2O – 8,65 % CuAl_2 – 6,9 % CaSi_2 – 2,2 % Sn – 0,25 % CaF_2) kompozicijos termito mišinys leidžia suvirinti Cu-Nb laidininkus optimaliame temperatūriniame diapazone be jų perlydymo su galimybe keisti termitinės siūlės geometriją, išlaikyti pasižymintį puikiu atskyrimu nuo suvirinimo siūlės šlako (anortito) kompoziciją ir optimalią jungties mikrostruktūrą, sudarytą iš kietojo Cu tirpalo ir dispersinės Fe fazės, užtikrinant geresnes jungties mechanines ir elektrines savybes, lyginant su lazerinio, elektronpluoščio ir slėginio suvirinimo magnetiniu lauku būdais, kur prastesnės mechaninės savybės apsprendžiamos Cu-Nb lydinio ir taikomų pridėtinių medžiagų savybėmis bei gaunama jungčių forma.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema išspausdinti septyni moksliniai straipsniai: keturi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į tarptautines duomenų bazines; vienas – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose; du – kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti dešimtyje mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje:

- tarptautinėje konferencijoje „*Advanced Materials and Technologies*“ 2016 m. Palangoje;
- jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2016 m. Vilniuje;
- tarptautinėje konferencijoje „*Modern Electrochemical Technologies and Equipment*“ 2017 m. Minske;
- respublikinėje konferencijoje „*Fizinių ir technologinių mokslų tarpdalykiniai tyrimai*“ 2017 m. Vilniuje;
- tarptautinėje konferencijoje „*Computation Engineering and Experimenting*“ 2017 m. Vienoje;
- tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials*“ 2017 m. Vilniuje;
- tarptautinėje konferencijoje „*Advanced Materials and Technologies*“ 2018 m. Palangoje;

- tarptautinėje konferencijoje „*Computation Engineering and Experimenting*“ 2018 m. Amsterdame;
- seminare Nacionaliniame Ukrainos technikos universitete 2018 m. Kijevas;
- respublikinėje konferencijoje „*Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai*“ 2019 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Darbo apimtis yra 104 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 23 numeruotos formulės, 42 paveikslai ir 18 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 107 literatūros šaltiniai.

Stiprių magnetinių laukų sistemų konstrukcijų, mikrokompozitinių laidininkų bei suvirinimo procesų ypatumų analizė

Šiame skyriuje pateikiamos impulsinių magnetų ir jų sudedamųjų konstrukcijos. Nagrinėjami Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų gamybos būdai, šių laidininkų ypatumai ir jų suvirinimo techninės galimybės, analizuojama suvirinimo procesų specifika.

Skyriaus tematika paskelbti 4 autoriaus (su bendraautoriais) straipsniai (G. Mikalauskas *et al.* 2016; G. Mikalauskas *et al.* 2018; G. Mikalauskas *et al.* 2017, G. Mikalauskas *et al.* 2019).

1.1. Impulsiniai magnetai

Šiuo metu magnetiniai laukai plačiai taikomi įvairiose mokslo, pramonės ir medicinos srityse. Jų panaudojimo galimybėmis domisi ir taiko kosminės agentūros bei karinė pramonė. Tai sparčiai besivystanti mokslo sritis ir technologijos, kur taikomi impulsiniai, pastovaus veikimo, sūkuriniai stiprūs magnetiniai laukai.

Laboratorinėmis sąlygomis sukurti pirmieji įrangos prototipai ir sugeneruoti ypač stiprūs magnetiniai laukai, kurių magnetinio lauko indukcija (tankis) siekia 100 T (Kindo 2006). Apskritai didžiausias laboratorinėmis sąlygomis sugeneruoto magnetinio lauko tankis siekė net 2800 T, tačiau tai buvo eksperimentas su magneto eksplozija. Šis rekordas buvo pasiektas dar 1998 metais, kuris iki šiol nėra pagerintas (Tesanovic 2013). Tačiau tokiems rekordiniams magnetiniams laukams generuoti skirta techninė įranga yra labai sudėtinga ir kol kas unikali.

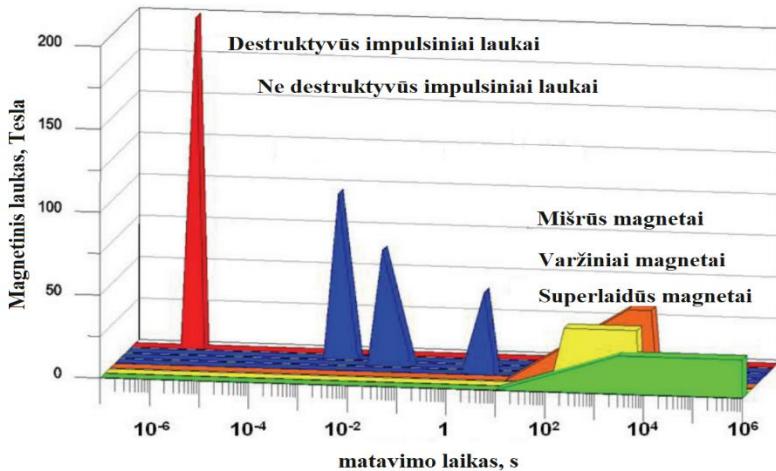
Daug paskutinių dešimtmečių svarbių atradimų buvo padaryta taikant būtent didelės galios magnetinį lauką. Stiprūs magnetiniai laukai tapo vienu iš labai svarbių mokslininkų instrumentų, kadangi jie iššaukia unikalius efektus: levitaciją, medžiagų struktūros pokyčius ir fazinius virsmus, magnetinį frakcijų separavimą, magnetinę anizotropiją ir orientaciją, superlaidumą ir kitus efektus.

Vis daugiau įvairių mokslo krypčių mokslininkų įsitraukia į šią tyrimų sritį, o didžiausią pažangą bei patirtį šių technologijų srityje turinčios tyrimų laboratorijos ir mokslo centrai iš įvairių šalių kooperuojasi bendriems tarptautiniams mokslo projektams vykdyti (Spahn *et al.* 2011). Garsiausieji tokių mokslo centrų ir tarptautinių konsorcių projektai jau įgyvendinti, arba vykdomi perspektyvūs projektai: statomas eksperimentinis (ITER) termobranduolinis reaktorius ir kiti egzistuojantys tokomakai, didysis hadronų priešpriešinių srautų greitintuvas CERN laboratorijoje, kuriamas naujos kartos kompaktiškas ARC reaktorius (1.4 pav.).

Lyginant pastovaus veikimo, impulsinius ar superlaidumu pagrįstus magnetus, impulsinės technologijos stipriems magnetiniams laukams generuoti yra labai patrauklios, nes nereikalauja tokių didelių investicijų kaip aukščiau įvardintos unikalios sistemos (Herlach *et al.* 2003). Norint generuoti magnetinį lauką, didesnę negu 2 T, jau reikalingi tuščiaviduriai superlaidūs solenoidai arba kitos įvairios hibridinės magnetinės sistemos. Didžiausias pastovus magnetinis laukas, kurį pavyko pasiekti: 2003 metais su hibridiniu magnetu buvo 45 T, 2011 metais su superlaidžiu magnetu – 35,4 T, o 2010 metais su varžiniu magnetu – 36,2 T.

Didesnio magnetinio tankio nei 45 T laukai gali būti generuojami tik trumpų impulsų pavidale. Dabartinis impulsinių magnetų rekordas, nesuardant paties magneto, yra 100 T, esant 10 μ s impulso trukmei. Šis rekordas buvo pasiektas Los-Alamoso nacionalinėje laboratorijoje 2012 metais, testuojant impulsinį magnetą, kuriame buvo panaudoti Cu-Nb mikrokompozitiniai laidininkai (Tesanovic 2013). Kaip matoma iš 1.1 pav., impulsiniai magnetai pajėgūs sugeneruoti žymiai stipresnį magnetinį lauką nei pastovaus veikimo ar superlaidūs magnetai, todėl impulsinės magnetinės sistemos tampa puikia alternatyva kitoms magnetinių laukų technologijoms daugelyje sričių. Stipraus pastovaus magnetinio lauko generavimas yra didelė prabanga dėl tokiai įrangai sumontuoti reikalingos infrastruktūros, brangių medžiagų, didelių žmogiškųjų, energetinių ir kitų

resursų. Tokių laukų generavimui skirtos magnetinės sistemos yra labai sudėtingos, brangios, ir tokią įrangą gali sau leisti turėti ir su ja eksperimentuoti tik stambios pasaulinio lygio laboratorijos ar mokslo centrai.



1.1 pav. Generuojami magnetiniai laukai (Tesanovic 2013)
Fig. 1.1. Generated magnetic fields (Tesanovic 2013)

Todėl pastaruoju metu mokslininkų žvilgsniai krypta į mažai energijos suvartojančias, tačiau rekordinius magnetinius laukus generuojančias ir minimalios infrastruktūros reikalaujančias impulsinių magnetinių laukų įrangas, kurios dažniausiai visiškai pakanka atlikti daugelį eksperimentinių tyrimų ten, kur reikia tokių stiprių magnetinių laukų. Be to, impulsinės magnetinės sistemos žymiai kompaktiškesnės, jų konstrukcija nėra tokia sudėtinga, todėl plačiau paplito ir prieinamos žymiai didesniai ratui mokslininkų ir gamintojų.

1.2. Stiprių magnetinių laukų impulsinių magnetų konstrukciniai ypatumai

Svarbiausia impulsinių ir pastovaus veikimo magnetų dalis – induktoriai. Eksperimentai ir bandymai tobulinti jų konstrukciją vyksta iki šiol, o problema lieka tokia pat aktuali. Dar 1920 metais mokslininkai Kapitsa ir Wall savo eksperimentuose sugeneravo 10 T impulsinius magnetinius laukus, taikant lauko generavimui nesudėtingos konstrukcijos vyniojamus induktorius, kurie net nebuvo aušinami. Laidininkai ataušdavo tarp generuojamų impulsų, todėl pauzė tarp impulsų buvo labai ilga (Shneerson *et al.* 2006). Nuo šių pirmųjų

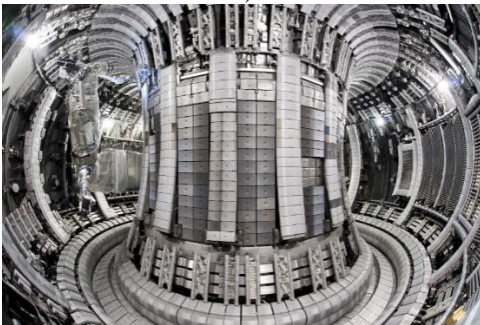
eksperimentų generuojamos magnetinės indukcijos amplitudė pasiekė jau 100 T, o induktorių laidininkus veikiantys mechaniniai įtempiai dėl magnetinio lauko poveikio viršija 4 GPa. Todėl impulsinio magnetinio lauko generavimo įrangos ir jos atsakingiausių komponentų tobulinimas lieka itin svarbus ir sudėtingas uždavinys. Egzistuoja keturi tipai daugiasluoksnių induktorių, kuriems naudojami vielos, juostos, sraigto ir disko formos laidininkai. Stiprių magnetinių laukų sistemų pavyzdžiai pateikiami 1.2 paveiksle.



a)



b)



c)



d)

1.2 pav. Stiprių magnetinių laukų sistemų pavyzdžiai: a) impulsinė magnetinė sistema (<https://www.ftmc.lt/funkciniu-medziagu-ir-elektronikos-skyrius>); b) impulsinės sistemos solenoidas (<https://www.ftmc.lt/funkciniu-medziagu-ir-elektronikos-skyrius>); c) eksperimentinis (ITER) termobranduolinis reaktorius; d) eksperimentinis termobranduolinis tokamakas (<https://phys.org/news/2013-11-unexpected-energy-barrier-uptake-hydrogen.html>);

Fig. 1.2. Examples of strong magnetic field systems: a) pulsed magnetic system (<https://www.ftmc.lt/funkciniu-medziagu-ir-elektronikos-skyrius>); b) pulsed magnetic system solenoid (<https://www.ftmc.lt/funkciniu-medziagu-ir-elektronikos-skyrius>); c) experimental (ITER) thermonuclear reactor; d) experimental thermonuclear tokamak (<https://phys.org/news/2013-11-unexpected-energy-barrier-uptake-hydrogen.html>);

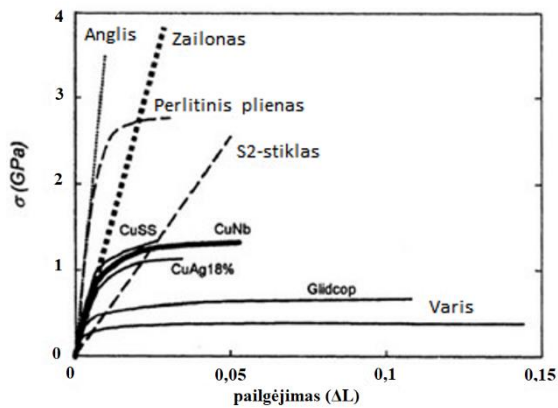
Daugiausia impulsinių magnetų konstrukcijose paplitę cilindriniai vyniojami daugiasluoksniai solenoidai. Bitterio ir vienasluoksniai solenoidai lieka nepakeičiami, kai reikia sugeneruoti labai mažos trukmės stiprų impulsą. Tipinės cilindrinės konstrukcijos impulsiniai induktoriai sudaryti iš daugybės laidininko

vijų. Tokiems induktoriams vynioti gaminami ir naudojami daugiausiai apvalios ir stačiakampio formos laidininkai. Taikant stačiakampio formos laidą gaunamas didesnis užpildymo faktorius nei su apskritimo formos skerspjūvio laidininkais. Laidininkų vyniojimui gali būti naudojamos specialios automatizuotos staklės (Suzuki *et al.* 2001), tačiau, jei laidininko skersmuo nėra didelis, pakanka paprastų pedalu valdomų motorizuotų (geriausia – reversinių) ar net mechaninių (ranka sukamu) staklių su vielos įtempimą palaikančiu mechanizmu. Dar viena iš induktorių konstrukcijos tobulinimo strategijų – tai modulinė struktūra, kai solenoidas suskaidomas į kelis koaksialinius modulius su nepriklausomu maitinimu.

Dėl poreikio nuolat stiprinti magnetinio lauko tankį, impulsinių magnetų konstrukcija pastoviai tobulinama, taikant naujas elektrotechnines ir armavimo medžiagas, sluoksnių vyniojimo techniką, papildomą armavimą.

1.3. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų struktūra, savybės ir taikymo sritys

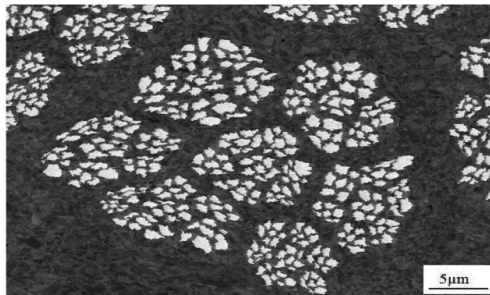
Laidininko parinkimas tam tikros konstrukcijos magnetui priklauso nuo planuojamo generuoti magnetinio lauko charakteristikų. Magnetinių laukų induktoriuose taikomų laidininkų dvi charakteristikos yra ypatingai svarbios: stiprumas ir laidumas. Iki 1980 metų induktorių vyniojimui buvo taikomi tik vario laidininkai. Varis – geras šilumos ir elektros laidininkas, tačiau ši medžiaga turi silpną mechaninį stiprį ir induktorių varinės vijos neatlaiko dėl magnetinio lauko poveikio jas veikiančios Lorencio jėgos (Višniakov *et al.* 2011). Rimtas proveržis šioje srityje buvo padarytas tik atradus metalo kompozitinius laidininkus (1.3 pav). Medžiagos, skirtos 5–100 T magnetinį lauką generuojančių solenoidų apvijoms gaminti, turi būti stiprios (stipris virš 750 MPa) ir laidžios elektros srovei (elektrinis laidumas virš 60–70 % IACS). Didelis stipris reikalingas milžiniškomis Lorencio jėgoms atlaikyti, o geras elektrinis laidumas – minimizuoti laidininkų šilimą dėl tekančios didelės elektros srovės. Šios medžiagos taip pat privalo pasižymėti pakankamu plastiškumu, kad laidininkai nelūžtų ir netrūkinėtų vyniojant induktorių apvijas (Gluchovski *et al.* 2011.). Šiuo metu impulsinių magnetų induktoriuose dažniausiai naudojamos keturios rūšys kompozitinių laidininkų: Cu-Nb ir Cu-Ag, mikrokompozitai GlidCop, makrokompozitiniai CuSS (Shneerson *et al.* 2006).



1.3 pav. Kompozitinių laidininkų mechaninės savybės (Shneerson *et al.* 2006)

Fig. 1.3. Mechanical Properties of Composite Conductors (Shneerson *et al.* 2006)

Cu-Nb mikrokompozitai šiuo metu yra geriausias laidininkas tarp analogiškų, nes pasižymi išskirtiniu stipriu ir laidumu. Jų stipris siekia 1100–1500 MPa (tuo tarpu paprasto Cu laidininko – 270 MPa), takumo riba – 850 MPa, elektrinis laidumas – 67–70 % IACS. Todėl Cu-Nb mikrokompozitai laikomi vieni iš perspektyviausių ir tinkamiausių iš šiuo metu egzistuojančių medžiagų stiprių magnetinių laukų impulsinėms sistemoms. Neseniai pradėta jų gamyba, tokių laidų metinė gamybos apimtis siekia iki 50 t per metus. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų struktūra sudaryta iš varinės matricos, kurioje yra įkomponuotos labai plonos niobio gijos. Nb gijos sutvirtina varinę matricą, užtikrina didesnę laidininko stiprį ir netrukdo elektronų judėjimui, t. y. elektros srovės tekėjimui (1.4 pav.) (Shikov *et al.* 2002).



1.4 pav. Cu-Nb laido skerspjūvis (gaminami kelių skerspjūvių: 2×3 mm; 3×5,8 mm; 4×6 mm) (Gluchovski *et al.* 2014)

Fig. 1.4. Cu-Nb wire cross-section (producing several cross-sections: 2×3 mm; 3×5,8 mm; 4×6 mm) (Gluchovski *et al.* 2014)

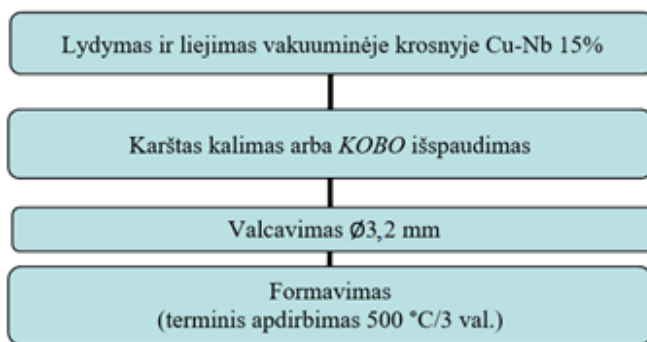
1.4. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų gamybos ypatumai

Cu-Nb laidininkų gamyba yra sudėtinga, didelio tikslumo ir nuoseklumo reikalaujanti technologija. Šiuo metu Cu-Nb mikrokompozitiniams laidininkams gaminti yra pasiteisinusios dvi gamybos technologijos:

1. Skirtingo mechaninio stiprio medžiagų sulydymas į mikro arba nanokompozitą – „in situ“ metodas (Leprince-Wang *et al.* 2003).

2. Gero laidumo laidininkų gijų suvijimas su mechaniškai labai stiprios medžiagos gijomis į vieną mikro arba nanokompozitinį laidininką (Shikov *et al.* 2002).

Pirmuoju atveju laidų gamybos procesas „lydymas–deformacija“ („in situ“) panašus į tradicinę metalinių vielų gamybos technologiją. „In situ“ gamybos technologija pateikta 1.5 paveiksle. Grynas varis ir niobis išlydomi tam tikra proporcija. Iš gauto vakuuminio lydymo metu Cu-Nb liejinio (struktūrą sudaro smulkūs Nb dendritai Cu matricoje) ekstruzijos būdu gaminami 20–50 mm strypai. Šie ruošiniai keliais etapais deformuojami iki reikalingo skersmens vielos. Taip, eilę kartų ištempiant Cu-Nb lydinio vielą, įmanoma pagaminti labai mažo skersmens gijas (iki 90 μm). „In situ“ Cu-Nb kompozito struktūra: Nb plaušai Cu metalinėje matricoje. Šios gijos vėliau įvelkamos į Cu šarvą (Gluchovski *et al.* 2014). Toks kompozitinis kabelis pasižymi dideliu stipriu. Jo stiprumo riba gali siekti 1 GPa, o elektrinis laidumas – 60–70 % IACS.



1.5 pav. Cu-Nb mikrokompozito gamybos technologija. „In situ“ metodas (Gluchovski *et al.* 2014)

Fig. 1.5. Production technology of Cu-Nb microcomposite. In situ method (Gluchovski *et al.* 2014)

Kita kompozitinių laidininkų gamybos technologija, „surinkimas-deformacija“ panaši į bimetalų gamybą (1.6 pav.).

1.1 lentelė. Nb gijų skaičiaus priklausomybė nuo pasikartojančių surišimo-deformavimo etapų kiekio (Gluchovski *et al.* 2011)

Table 1.1. Nb strings dependence on the number of repeat binding-deformation steps (Gluchovski *et al.* 2011)

Deformacijų kiekis	Nb kiekis %	Nb gijų kiekis
1	47	7
2	36	49
3	30	343
4	24	2401
5	19	16 807
6	15	117 649
7	12	823 543

Pirmu būdu gaminamų Cu-Nb laidininkų pagrindinis trūkumas, tai sunkumai suvynioti magnetinę ritę ar juos lankstyti dėl jų trapumo. Antru būdu gaminami laidininkai gali būti lankstomi, sunkiau lūžta, jų stiprumo riba siekia 1,5 GPa, elektrinis laidumas – 65–75 % IACS. Šių laidininkų savybes perspektyvoje dar tikimasi pagerinti iki 2 GPa stiprio, nebloginant elektrinio laidumo (Shikov *et al.* 2002).

Pagrindiniais tokių superstiprių laidininkų vartotojais taps aviacija, kosmonautika, greitasis geležinkelio transportas, branduolinė, šiluminė ir alternatyvioji energetika bei mokslo centrai. Cu-Nb kompozitai laikomi vieni iš tinkamiausių medžiagų ateities elektros transformatoriams, stiprių magnetinių laukų induktoriams, variklių rotoriams, didelės galios elektros linijoms, indukcinio suvirinimo įrangai arba technologinei įrangai, skirtai gaminių deformacijai magnetiniu būdu.

1.5. Suvirinimo būdų pritaikomumo ir specifikos apžvalga

1.5.1. Termitinio suvirinimo ypatumai

Tarp įvairių specialių suvirinimo būdų termitinis suvirinimas atrodo praktiškiausiu sprendimu. Šios technologijos didžiausias privalumas yra termitinių reakcijų pritaikymo galimybės, Cu-Nb lydinių (su redukuotu aliumoterminiu mišiniu sumaišytu su CuO, Nb₂O₅ oksidais, Al pudra ir CaO flusu), jau buvo aprašytos I. G Sharma darbe. Daug naujų mokslinių publikacijų

yra apie nanotermitus Al-CuO pagrindu. Jų egzoterminės reakcijas jau bandoma pritaikyti SHS (self-propagating high-temperature syntesis) ir MSR (mechanically induced self-propagating reaction) srityje. Todėl hipotetiškai tikimasi, kad, panaudojant analogišką technologiją, gali būti sujungiami ir Cu-Nb mikrokompozitiniai laidininkai.

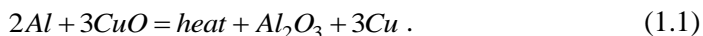
Termitinis suvirinimas yra seniai žinomas suvirinimo metodas. Pirmasis savaiminę aukštos temperatūros reakciją (dar vadinama termitine reakcija) pasiūlė Goldsmidt 1885 m. Ši suvirinimo metodą plačiai taiko transporto srityje bėgių suvirinimui ir elektrotechnikoje elektrinių ir įžeminimo kabelių suvirinimui. Termitinis suvirinimas išsiskiria tarp kitų suvirinimo būdų savo aukštu suvirinimo operacijos greičiu, nepriklausomybe nuo elektros energijos šaltinio ar dujų, nesudėtinga įranga, galimybe vykdyti darbus sudėtingose montavimo sąlygose, netgi užpildytoje nedegiosiomis dujomis atmosferoje ir absoliučiaje vakuume.

Neardomos jungtys gaunamos molekuliniam lygyje, todėl būna ilgaamžės ir praktiškai nepaveikiamos atmosferinės korozijos, ribinė elektros srovė dažniausiai lygi arba aukštesnė nei paties laidininko. Šiuo atveju detalės suvirinamos išlydytu metalu, kuris išlydomas dėl cheminės egzoterminės reakcijos su intensyviu šilumos išsiskyrimu (temperatūra siekia 2300–2700 °C).

Egzistuoja trys termitinio suvirinimo atmainos: termitinis suvirinimas spaudimu, suvirinimas lydymu (su tarpiniu liejimu) ir kombinuotas metodas. Visi termitinio suvirinimo būdai vykdomi panaudojant lengvai užsiliepsnojančias medžiagas – termitinį mišinį, kurio sudėtyje didžiausią dalį sudaro metaliniai milteliai ir metaliniai oksidai.

Laidų suvirinimui taikomas tik suvirinimas su tarpiniu liejimu, panaudojant specialias ugniai atsparias formas arba piropatronus su termitiniu mišiniu. Kiti metodai tinkami stambiagabaričių detalių termitiniam suvirinimui.

Goldschmidt reakcija yra termitinio suvirinimo taikymo pagrindas. Ši reakcija aprašoma formule:



Termitinių mišinių degimo reakcijas aprašo iš esmės chemiškai grynų komponentų sąveika. Praktikoje termitiniai mišiniai gaminami iš žymiai pigesnių komponentų. Aliuminis – populiariausias ir pigiausias iš termitinėje reakcijoje naudojamų metalų, nors ir kiti metalai gali būti naudojami vietoje jo. Tačiau tai retai taikoma praktikoje, kadangi Al savybės praktiškai idealiai tinka šiems tikslams. Virintinių jungčių savybėms pagerinti, metalo išeigai padidinti, egzoterminės reakcijos temperatūrai sumažinti, šlako savybėms pagerinti į termito sudėtį įmaišomi įvairūs priedai (ferolydiniai FeMn ar FeSi, silicidas CaSi₂ ir kita).

Keičiant priedų kiekį termite, galima plačiame diapazone keisti šlako ir gaunamos jungties metalo cheminę sudėtį bei savybes. Analizuojant įvairių pasaulio šalių patentuose (1.2 lentelė) pateiktą informaciją, matoma, kad

daugiagyslių ir pilnavidurio skerspjuvio varinių laidų suvirinimui dažniausiai taikomo termitinio mišinio sudėtyje yra iki 80 % vario oksido ir 12 % vario miltelių, 11 % aliuminio arba jo lydinio, 18 % kitų priedų. Sujungiamo metalo oksidinės plėvelės įtaka galima papildomai mažinti naudojant flusus, kuriais prieš suvirinimą padengiami sujungiami paviršiai. Neutralūs flusai, kurių sudėtyje yra kalcio fluoridų CaF_2 , gali išardyti oksido plėveles vario lydiniuose. (ASM Handbook Vol. 15 2008). Kalcio fluoridas (CaF_2) gali būti naudojamas siekiant sumažinti šlako lydymosi temperatūrai ir reakcijos produktų (šlako) takumui padidinti. Todėl išlydytas metalas lengviau atskiriamas nuo šlako ir užpildo tiglio ertmę. Tačiau praktikoje varinių laidų termitinis suvirinimas vykdomas nenaudojant papildomai flusų, kadangi nustatyta, kad gaunamos termitinės jungties kokybė praktiškai nepriklauso nuo šio flusų panaudojimo. Tuo pačiu tikslu CaF_2 gali būti įvedamas į termitinio mišinio sudėtį.

1.2 lentelė. Termitinių mišinių cheminės sudėtys

Table 1.2. Chemical composition of thermite mixtures

Termininis mišinys	Komponentai, masės %											
	CuO (II)	Cu ₂ O (I)	Cu	CuAl ₂	FeSi	FeMn	Pb	CaSi ₂	Al	ZnO	CaF ₂	Sn
JAV patentas Nr. 2010046666	40,0		50,0					6,1	3,4			
JAV patentas Nr. 2870499		72,9	9,15					2,1	9,15	0,6	2,1	4,0
Rusija, mišinys TY 1793-002-12719185-2009		70,00		20,0					10,0			
Rusija (autorinis pažymėjimas SU №370455)	67,2			32,8								
Rusija (autorinis pažymėjimas SU №92367)	64,0			20,00		16,0						
Rusijos patentas Nr. 2357846	65,0–71,9		11,2–12,0		2,2–3,5	6,7–10,5			8,0–9,0			
Rusijos patentas Nr. 2385208	66,7–61,7		11,0–11,6			12,8–13,3	1,5–5,0		8,0–8,4			

Iš esmės yra daug reaktyvių metalų, kuriuos galima naudoti vietoje Al, o taip pat sudaryti kompleksines termito sistemas su dviem chemiškai nepriklausomomis arba susietomis reakcijomis (Takacs 2002). Dar vienu iš metalų, kurie taikomi vario lydinių termitinio suvirinimo mišiniuose, gali būti alavas. Alavo ir vario oksido mišinys taip pat priskiriamas prie termitų, pagal Ellingham diagramą jis gali redukuoti varį, tačiau šios egzoterminės reakcijos išskiriama šiluma

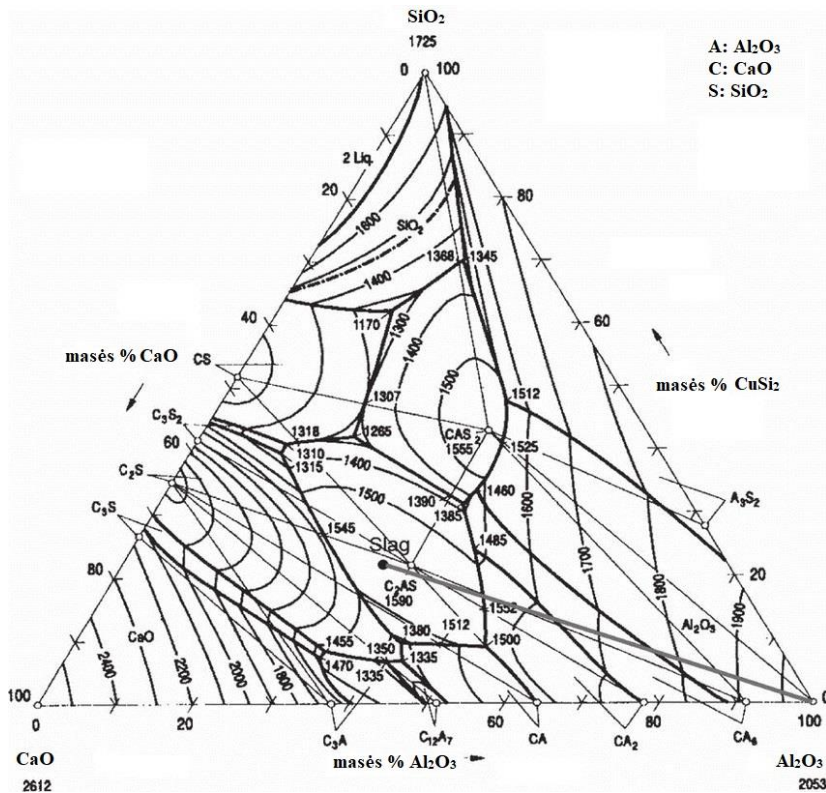
nedidelė. Šiuo atveju alavo panaudojimas gali būti pagrįstas tuo, kad alavas pagerina paviršiaus suvilgimą skystu metalu. Diskiniam įdėklui dažniausiai naudojamas fosforinis deoksiduotas varis, kuris yra geras deoksidatorius ir tai gerina jungties kokybę. Taip pat gali būti naudojami ir plieniniai diskiniai įdėklai. Nedidelis geležies priemaišos kiekis, kaip rodo praktika, nekenkia termitinės jungties savybėms.

Dar viena dažnai naudojama strategija sumažinti termitinės reakcijos temperatūrą ir greitį – tai inertinių junginių įvedimas į termitinio mišinio sudėtį. Šiuo atveju Al_2O_3 , CaO , SiO_2 priemaišos (šlako komponentai), kurie yra variniuose termitiniuose mišiniuose, lėtina reakcijos greitį ir uždegimo temperatūrą. Inertiški priedai, kurie patenka tarp reagentų dalelių, mažindami kontaktinį paviršių, atitinkamai mažina ir reakcijos greitį (Takacs 2002).

Atsižvelgiant į tai, kad Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų pagrindą sudaro varis, analogiški techniniai sprendimai ir termitiniai mišiniai galėtų būti taikomi ir šių laidininkų sujungimui. Vario lydinių termitiniam suvirinimui populiariausieji termito mišiniai, kurių sudėtyje be oksidatoriaus CuO ir/arba Cu_2O ir kuro Al naudojama CaSi_2 (kurio standartiškai būna virš 5 masės %). CaSi_2 ir Al kombinacija (kaip kuras) moliariniam santykiu nuo 0,25:1 iki 16:1 užtikrina, kad mišinio egzoterminės reakcijos metu bus pasiekta aukšta temperatūra ir formuojantis šlakui sistemos $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$, kuris turi žemesnę nei Al_2O_3 kristalinio šlako lydymosi temperatūrą, o taip pat pasižymi mažesniu tankiu ir geresniu atsiskyrimu ir takumu. Al_2O_3 tankis – 3960 kg/m^3 , lydymosi temperatūra 2054°C . CaSi_2 turi teigiamą įtaką termitinio mišinio uždegimo ir degimo temperatūrai.

Dažniausiai naudojama Al ir CaSi_2 kombinacija moliariniam tūryje nuo 2:1. Tokiu atveju termitinės reakcijos metu formuojamas stiklinis amorfinis (glassy amorphous) šlakas, kuris turi mineralo anortito sudėtį ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Jo tankis 2700 kg/m^3 , lydymosi temperatūra 1550°C (1.7 pav.). Tokio šlako sudėtis pagal $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ Renkin diagramą išreikšta masės procentais: CaO – 20,14 %, SiO_2 – 43,17 %, Al_2O_3 – 36,69 %. Anortito šlako susidarymas yra labai palankus, nes daugumoje termitinių mišinių reakcijų metu gaunamas keraminis šlakas Al_2O_3 . Anortito susidarymo reakcija yra savaimis egzoterminis procesas, kuris padidina bendros reakcijos temperatūrą, padeda sujungti skystą metalą susidariusį egzoterminio proceso metu. Yi Hu Chun tyrimai pademonstravo, kad termitinio mišinio adiabatinė temperatūra (maksimali gaunama termitinio mišinio reakcijos temperatūra) turi būti aukštesnė nei 2083°C , kad įvyktų pilnas šlako atsiskirimas.

Ši temperatūra taip pat neturi viršyti 2573°C , nes tokiu atveju bus generuojama per daug vario garų, jeigu reakcija vyksta atmosferoje. Be to, šios reakcijos temperatūra turi viršyti visų mišinyje esančių metalų lydymosi temperatūrą, bet neviršijant šių metalų virimo temperatūros. Cu lydymosi temperatūra yra 1085°C , virimo temperatūra – 2567°C .



1.5.2. Lazerinio suvirinimo ypatumai

Lazerio spindulys yra vienas iš didžiausių galios šaltinių, taikomų pramonėje suvirinimui. Tačiau, skirtingai nei elektronpluoščiame suvirinime, lazeriniam suvirinimui paprastai nenaudojamas vakuumas.

Lazerinis suvirinimas suteikia daug privalumų. Įmanomas suvirinimas be pridėtinio metalo, didelio storio medžiagų suvirinimas, skirtingų medžiagų suvirinimas, hibridinis lazerinis suvirinimas, bekontaktis suvirinimas, tai ekologiška technologija, galimi įvairūs šaltiniai, kurių bangos ilgis nuo 0,532 iki 10,6 μm , impulsiniai ir nuolatiniai režimai (Jayanthi *et al.* 2016). Iš daugelio šiandien prieinamų lazerių tipų dvi rūšys dominuoja suvirinimo srityje: CO_2 ir Nd:YAG lazeriai. Tik jie gali suteikti pakankamai didelės galios spindulį. Dujiniai CO_2 lazeriai paprastai būna nepertraukiamo veikimo. Tačiau, Nd:YAG lazeriai, gali veikti didelės galios nepertraukiamo veikimo ir impulsiniu režimu, o šių kietakūnių lazerių spinduliuotės perdavimas per skaidulinę optiką mažina klasikinių dujinių CO_2 lazerių populiarumą ir taikomumą. Nd:YAG lazeriai turi galimybę formuoti skirtingo dažnio impulsus ir keisti impulso trukmę. Tai suteikia galimybę kontroliuoti įvedamą šilumą, kuri anksčiau buvo sunkiau valdoma lazerinio suvirinimo sistemose (Tzeng 2000).

Didžiajai daliai metalų suvirinimui lazerio bangos ilgis nėra labai svarbus parametras. Išimtis yra varis ir jo lydiniai. Vario lazerinis suvirinimas yra labai sudėtingas, nes varis ir jo lydiniai turi didelį šiluminį laidumą ir atspindį nuo paviršiaus (Laser welding fundamentals 2016). Skirtingų metalų absorbcija priklauso nuo lazerio spinduliuotės bangos. CO_2 lazeriai paprastai turi 10,6 μm bangos ilgį. Varis atspindi maždaug 99 % CO_2 lazerio spinduliuojamos tokio bangos ilgio šviesos, todėl varį ir jo lydinius sunku suvirinti CO_2 lazeriais (Walsh 2002).

Nd:YAG lazeriu, kuris yra naudojamas metalų suvirinimui pramonėje, bangos ilgis yra 1,064 μm . Vario absorbcija, esant tokiam bangos ilgiui, yra irgi tik 2–3 % (Walsh 2002). 97–98 % lazerio spinduliuotės energijos atsispindi nuo vario paviršiaus ir nedalyvauja medžiagos kaitinime, todėl ir šiuo atveju proceso pradžioje reikia specialių sprendimų. Norint išvengti atspindžio efekto ir reikšmingo šilumos nuvedimo, reikalingas itin didelis galios tankis. Tai reiškia, kad didelė lazerio galia (keli kW) turi būti sutelkta 0,05–0,15 mm^2 plote, kad suvirintų varį, kurio storis yra tik keli milimetrai (Herrmann *et al.* 2013).

Suvirinimas gali būti atliktas suvirinant atskirą tašką arba suvirinimo siūlę. Cu suvirinimui reikalinga didelė galia ir spindulio koncentracija, todėl Cu suvirinimui netaikomi nepertraukiamo veikimo lazeriai. Nd:YAG lazeris veikia impulso režimu, todėl lazeris gali pasiekti momentinę galią, kuri yra didesnė už jo vidutinę galią (Hitz *et al.* 2001). Pavyzdžiui, 400 W impulsinis Nd:YAG lazeris kelias milisekundes gali generuoti 14 kW galios impulsą. Todėl impulsinis lazeris dažniausiai naudojamas Cu ir jo lydinių taškiniam ir siūliniam suvirinimui.

Naudojant impulsinius lazerius, suvirinimo siūlė formuojama persidengiant atskiriems taškams (Laser welding fundamentals 2016).

Apžvelgus literatūrą (Katayama 2015; Zhou 2008) išsiaiškinta, kad norint išlydyti Cu lydinius su Nd:YAG lazeriu, minimali reikalinga galia yra 300 W. Naudojant rinkoje esančius pramoninius lazerius, suvirinimo siūlės, kurių suvirinimo gylis yra keli milimetrai, galima gauti tik su mažu suvirinimo greičiu ($v < 10$ m/min) (Heidera *et al.* 2015). Esant nedideliame suvirinimo greičiui, dažniausiai procesas tampa nestabilus, dėl ko gali atsirasti suvirinamo metalo purslai ir kiti suvirinimo defektai (Heidera *et al.* 2015). Siekiant sėkmingai suvirinti varį ir išvengti suvirinimo purslų, suvirinimo procesas turi būti pradėtas naudojant mažesnę lazerinę galią, kuri vėliau nuosekliai didėja iki nominalios.

Siekiant padidinti siūlės kokybę, turi būti suformuota ilga ir ovali suvirinimo vonelė, kurioje dėl turbulencijos lydalas gali būti intensyviau aušinamas. Atsižvelgiant į tai, kokiu greičiu varis kristalizuojasi – tai labai sunku pasiekti. Paprasčiausi ir efektyviausi keičiami parametrai yra lazerio galia ir suvirinimo greitis, nes įvirinimo gylis didėja didinant lazerio galią ir mažinant suvirinimo greitį (Heidera *et al.* 2015; Castillejo *et al.* 2014).

Vario ir jo lydinių suvirinimo siūlė paprastai būna minkštesnė nei pagrindinis metalas. Esant vandeniliui, deguonies prisotintas varis gali tapti trapesniu, kai jis įkaista iki 726,85 °C. Vario oksidai, kurie pirmiausiai dislokuojasi grūdų ribose, chemiškai redukuojami vandeniliu iki $\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$. Garai spaudžia grūdų ribas ir sukelia tarpkristalinius trūkius. Todėl, virinant varį ir jo lydinius, rekomenduojama naudoti apsauginės dujas (Ar 99,99 % grynumo arba dujų mišinius) (Herrmann *et al.* 2013).

Tinkamos sudėties apsauginės dujos gali paveikti suvirinamo metalo lazerio spindulių absorbciją, paveikdamos plazmą ir suvirinimo vonelės paviršių (Jokar *et al.* 2013). Todėl Cu suvirinamumas dar labiau pagerėja naudojant metodus, kurie padidina spinduliuotės absorbcijos efektyvumą, taip padidinant įvirinimo gylį. Šios metodikos numato pagalbinių dujų Ar-O₂ (50–80 % O₂) naudojimą, skatinant oksido susidarymą suvirinimo metu (Biro *et al.* 2002), o taip pat Cu ruošinio padengimą metaliniu (stelito, nikelio) ar oksido sluoksniu prieš suvirinimą (Genc Oztoprak *et al.* 2013; Hashimoto *et al.* 1991; Daurelio *et al.* 1991). Cu paviršiaus oksidavimas ar papildomas padengimas padidina absorbciją, tai leidžia suvirinti Cu naudojant daug mažesnę lazerio galią (Genc Oztoprak *et al.* 2013). Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad lazerinio suvirinimo efektyvumas ženkliai padidėja panaudojus vario pagrindu pagamintus nanokompozitinius absorberius. Gryno vario atspindėjimas buvo smarkiai sumažintas (t. y. ~73 %) purškiant kompozitinį absorberį ant jo paviršiaus (Chen *et al.* 2015).

Nd:YAG lazerinių šaltinių išėjimo galios moduliavimas yra vienas iš metodų, norint sumažinti suvirinimo metalo poringumą Cu lydiniuose. Lazerio galios moduliavimas funkciniu generatoriumi turi didžiausią teigiamą įtaką vario

suvirinimo lazeriu kokybei (Chen *et al.* 2015). Paprastai lazerio optika išstatoma taip, kad lazerio spindulys būtų $5\text{--}18^\circ$ kampu į bandinio paviršių, kad būtų išvengta atspindinčios šviesos sugadinimo (Biro *et al.* 2002; Hess *et al.* 2011; Bono *et al.* 2013).

Cu galima suvirinti vakuume, taip išvengiant skysto metalo purslų, virinant mažu greičiu. Šiuo atveju galima gauti didesnę įvirinimo gylį, naudojant mažesnę lazerio galią. Vario suvirinimas su 4 ir 8 kW impulsinio lazerio galia (su $50\text{--}80\text{ kW/mm}^2$ intensyvumu) tampa įmanomas be purslų susidarymo ir pasiekiant 3 mm įvirinimo gylį (Reisgen *et al.* 2017). Skirtingų medžiagų (pvz.: Cu su Al ar plienu) 1 mm storio sandūrinės siūlės buvo suvirintos be pridėtinio metalo, naudojant 350 W impulsinį Nd:YAG lazerį ir 0,2 mm vario-berilio lakštą (Genc Oztoprak 2013; Akbari Mousavi *et al.* 2010). Cu ir jo lydinių lazeriniam suvirinimui lazeriu gali būti naudojama nuo 0,1 mm iki 1,0 mm skersmens pridėtinė viela. Pridėtinės medžiagos naudojimas leidžia užpildyti nedidelius tarpelius, užpildyti griovelius ar pašalinti kitus paviršinius defektus (X arba V formos jungtys), įtakoti jungties cheminę sudėtį ir savybes, leisti taikyti mažiau tikslų sujungiamų briaunų paruošimą, sumažinti elektronų pluošto judėjimo netikslumo įtaką (Banasik *et al.* 2012; Dilthey *et al.* 1995; Sun *et al.* 1997).

Skirtingų medžiagų suvirinamumas lazeriu apžvelgtas literatūros šaltiniuose (Jayanthi *et al.* 2016; Grigorjanc 1989; Sun *et al.* 1995). Gerą skirtingų medžiagų suvirinamumą galima pasiekti tik tada, kai suvirinamos medžiagos turi panašią lydymosi temperatūrą ir egzistavimo skystame būvyje diapazoną. Suvirinamumas yra prastas, kai vienos medžiagos lydymosi temperatūra yra artima kitos medžiagos virimo temperatūrai.

Todėl Cu ir Nb gali būti suvirinti tik su specialiomis atsargumo priemonėmis, nes šios medžiagos turi skirtingus lydymosi taškus. Cu lydymosi temperatūra yra 1085°C , o virimo temperatūra 2567°C . Nb lydymosi temperatūra yra 2468°C , o virimo temperatūra 4927°C . Todėl, lydiniai turintys didelę Nb koncentraciją, gali būti suvirinti naudojant kaitinimą dėl šiluminio laidumo, tokiu atveju pasiekiamas minimalus Cu išgarinimas. Didžiajai daliai metalų suvirinimas tokiu būdu atliekamas mažu galios tankiu, esant $10^4\text{--}10^5\text{ W/cm}^2$ (paprastai $0,5\cdot 10^5\text{ W/cm}^2$), formuojant plačią ir negilią suvirinimo siūlę.

Suvirinimas su giliu įvirinimu vyksta esant vidutiniam galios tankiui virš 10^6 W/cm^2 (dažniausiai apie $1\cdot 10^6\text{ W/cm}^2$) ir taip pasiekiamas gilesnis įvirinimas nei naudojant šiluminį laidumą. Didinant galios tankį iki $1,5\cdot 10^6\text{ W/cm}^2$, pereinama prie pasižyminčio giliomis ir siauromis siūlėmis suvirinimo, kai kraštinių santykis yra didesnis negu 1,5 karto. Įvairiuose šaltiniuose (Grigorjanc 1989, Grigorjanc *et al.* 2006, Anisimov *et al.* 1970) nurodyta, kad kritinis galios tankis reikalingas išlydyti Cu yra apie $2,6\cdot 10^6\text{ W/cm}^2$. Šaltinyje nurodyta (Bono *et al.* 2013), jog kritinis galios tankis $3\cdot 10^6\text{ W/cm}^2$ ir impulso energija 40 J yra pakankami, kad pradėtų lydyti Cu fokusuoto lazerio pluoštu.

1 mm storio gryo Cu plokšteles galima lydyti taikant $5,9 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ galios tankį ir 0,5 J impulso energiją. Todėl Cu-Nb laidininkų suvirinimas turi būti atliekamas didesniu nei $3 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ ir mažesniu nei $5,9 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ galios tankiu. Didesnis galios tankis yra kenksmingas suvirinimo procesui, nes medžiaga intensyviai išgarinama ir ištaškoma, o skystosios fazės lazerio veikimo zonoje beveik nėra.

1.5.3. Elektronpluoščio suvirinimo ypatumai

Elektronpluoštis suvirinimas yra efektyvus procesas suvirinant vario ir skirtingų metalų jungtis, užtikrinant aukštą fizikines ir mechanines virintinių jungčių savybes ir išsaugant metalo grynumą siūlėje ir priesiūlės srityje. Elektronpluoštis suvirinimas vykdomas vakuume. Kaitinamo metalo apsauga vakuumu ir didelis galios tankis iki 10^6 W/cm^2 leidžia suvirinti metalus ir lydinius, pasižyminčius aukštu šiluminiu laidumu, šiluminio plėtimosi koeficientu, chemiškai aktyvius, sunkiai lydomus ir giminingus deguoniui, vandeniliui, azotui (varį, niobį, titaną ir kitus metalus). Šiuo metodu gaunamos siūlės, kurių santykis tarp įvirinimo gylio ir pločio siekia 20:1 ir daugiau. Naudojant elektronpluoštį suvirinimą reikia įvesti 4–5 kartus mažiau šilumos nei lankinio suvirinimo metu, todėl gaminių deformacijos būna ženkliai mažesnės. Suvirinant vario lydinius šiuo metodu pagrindinės problemos susietos su intensyviu metalo garavimu vakuume, jei jis perkaitinamas virš lydymosi temperatūros, o taip pat su dideliu šio metalo šiluminiu laidumu. Didelė energijos koncentracija suvirinant plonasienius Cu gaminius neleidžia gauti kokybiškos siūlės, todėl mažų storių gaminių suvirinimą atlieka nesufokusuotu elektronų pluoštu, kurio fokusas būna šiek tiek aukščiau suvirinamo paviršiaus arba švytuojantį pluoštą. Priemaišų kiekis Cu lydinuose mažina įvirinimo gylį ir terminio poveikio srities matmenis.

Kai tiriamo mikrokompozito laido sudėtis yra 82 masės % vario ir 18 masės % niobio, galima gauti panašią suvirintos jungties cheminę sudėtį po elektronpluoščio suvirinimo be užpildymo medžiagos arba naudojant panašią užpildo medžiagą. Vario-niobio gijinių mikrokompozitų išeigos ir stiprumas tempiant gali būti prognozuojamas kaip niobio kiekio funkcija, taikant barjerų stiprinimo modelį.

Nuo padidėjusio niobio kiekio padidėja vario-niobio mikrokompozitų stiprumas, kuris daugiausia didėja dėl niobio gijų turio ir veikia kaip barjeras (Spitzig *et al.* 1987; Hong 2000). Vario-niobio laidininkų mikrostruktūra ir fazių sudėtis priklauso nuo elektronpluoščio suvirinimo metu naudojamų apsauginių dujų. Lydinio suvirinimo metu atmosferos priemaišos gali patekti į išlydytą suvirinimo medžiagą. Įsiskverbusios dujos, tokios kaip deguonis ir azotas, stipriai įtakoja suvirintų jungčių struktūrą ir savybes (Munitz *et al.* 2009). Viena iš tinkamiausių vario-niobio laidininkų suvirinimo technologijų yra žemos įtampos,

didelės srovės elektronų pluošto suvirinimas vakuume, be užpildo arba išankstinio pašildymo.

Elektronų pluoštu suvirintos siūlės įvirinimo gylis stipriai priklauso nuo spindulio fokusavimo ir judėjimo greičio (Burgardt *et al.* 1992). Medžiagoms, turinčioms didelį šilumos laidumą (pvz.: variui), pirmenybė teikiama suvirinimo greičiui, siekiant pagerinti įvirinimą ir sumažinti per didelį šoninio lydymosi procesą. Dėl tos pačios priežasties Cu-Nb laidininkų suvirinimui buvo naudojamas nefokusuotas spindulio pluoštas, kadangi šis metodas padeda sumažinti galios tankį ir pagal laidumo mechanizmą formuoti ploną laidininko sluoksnio lydymą.

1.5.4. Suvirinimas impulsiniu magnetiniu lauku

Magnetinio lauko, kaip slėgį sukuriančio impulsinio energijos šaltinio, taikymas yra paplitęs metalų apdorojimo ir sujungimo praktikoje. Suvirinimas impulsiniu magnetiniu lauku įgyvendinamas dėl dideliu greičiu susiduriančių ruošinių kinetinės energijos. Dinaminės jėgos, sukeliančios ruošinių susidūrimą, atsiranda ruošinio metale dėl induktoriaus sukuriama magnetinio lauko spaudimo iki 10^8 H/m^2 . Šiuo metu induktoriaus ir ruošinyje indukuojamų magnetinių laukų sąveika sukuria atstumiančiąją jėgą, dėl to viena iš jungties dalių susiduria su kita dalimi ir vyksta jų suvirinimas. Dėl susiduriančių dalių stiprios deformacijos iš kontakto srities pašalinamas oksido sluoksnis ir sujungiami paviršiai prisiartina iki atstumo, kuris yra artimas kristalinės gardelės matmenims (Kvasnickij 2003).

Dėl magnetinio lauko ypatumo ir galimybės prasiskverbti pro magnetiškai skaidrias medžiagas įmanoma suvirinti medžiagas skirtingose terpėse (vakuume, apsauginėje atmosferoje ir ore) be tiesioginio kontakto tarp induktoriaus ir sujungiamų detalių (Belij *et al.* 1978).

Naudojant trumpalaikį impulsinį magnetinį lauką, kurio veikimo trukmė apskaičiuojama mikrosekundėmis, o dažnis 1–20 kHz, įmanoma suvirinti įvairias medžiagas, tačiau tai turi būti gero elektros laidumo medžiagos (Al, Cu, Mg, Ag, Au). Kitus metalus ir nemetalines medžiagas yra įmanoma suvirinti taikant tik geru elektros laidumu pasižyminčias tarpines-palydovus (dažniausiai varines) arba galvanines dangas bei dar didesnį impulsų dažnį 50–100 kHz.

Sujungimas šiomis sąlygomis įvyksta tik dėl paviršių sukibimo, difuzijos procesai neturi laiko išsivystyti. Suvirinant magnetiniu lauku magnetinio lauko spaudimas gali būti sukoncentruotas labai mažame sujungiamų elementų ilgyje, kuris gali būti proporcingas jų storiui. Dėl induktorių pernelyg didelio kaitimo ir techninių sunkumų sukurti labai stiprų magnetinį lauką šį suvirinimo būdą neįmanoma taikyti didelio pločio jungčių suvirinimui. Maksimalūs sujungiamų detalių matmenys (skersmuo, suvirinamas plotas) priklauso nuo įrangos generuojamo impulso energijos, metalo storio ir jo elektros laidumo.

Suvirinimo procesą impulsiniu magnetiniu lauku galima valdyti keičiant impulso trukmę, jungiamų detalių susidūrimo greitį ir paviršių susidūrimo kampą. Šie parametrai, esant tam tikrai jų kombinacijai, suteikia reikiamą spaudimą sujungiamiems paviršiams jų susidūrimo metu ir spaudimo lokalumą. Todėl juos galima laikyti pagrindiniais suvirinimo impulsiniu magnetiniu lauku dinaminiais parametrais.

Maksimalus susidūrimo greitis pasiekimas 1 mm storio variui, yra apie $8,8 \cdot 10^3$ m/s, o kinetinės energijos tankis 340 J/mm^3 .

Laidų jungiamųjų antgalių, metalinių lynų ir laidų sujungimas tarpinėmis movomis yra populiarus ir patikima technologija. Jungties, pagamintos impulsiniu magnetiniu lauku, elektrinė varža iki 2 kartų mažesnė nei gaunama mechanškai ar hidrauliškai presuotos jungties, o mechaninis stipris gali nenusileisti laido ar lyno stipriui. Presuojamos dalies užpildymo koeficientas artimas. Suvirinimui impulsiniu magnetiniu lauku tinkami ne tik apvalaus skerspjūvio laidai. Ruošiniai gali būti ovalios, stačiakampio profilio ir net kūgio formos. Apspaudžiamos laidininko dalies ilgis apskaičiuojamas iš santykio $l/d = 1,5-2$ (Belij *et al.* 1978).

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikus mokslinių darbų, teorinių pagrindų ir eksperimentinių tyrimų rezultatų apžvalgą galima teigti, kad išsamių duomenų ir eksperimentinių tyrimų rezultatų apie Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų suvirinimo galimybes nerasta, tačiau poreikis turėti patikimą ir praktišką mikrokompozitinių laidininkų sujungimo technologiją tapo svarbi stiprių magnetinių laukų sistemų kūrėjams.
2. Apibendrinant pirmojo skyriaus pateiktą informaciją apie stiprių magnetinių laukų sistemų ypatumus ir Cu-Nb laidininkus, galima konstatuoti, kad, sujungiant kompozitinius laidininkus lydomuoju suvirinimu, jų struktūra gali būti pažeidžiama, o išsilydant mikrokompozito matricai įvyktų negrįžtamieji struktūros pokyčiai, dėl ko ženkliai pablogėtų svarbiausios savybės. Šią problemą išspręsti hipotetiškai įmanoma panaudojant suvirinimą kietoje fazėje ir kitus mažiausiai mikrokompozito struktūrą pažeidžiančius specialius suvirinimo būdus, nes mikrokompozitų gamybos procesas analogiškas slėginiam suvirinimui.
3. Analizuojant literatūroje pateiktą informaciją nustatyta, kad:

- 3.1. Cu-Nb laidininkų suvirinimas yra įmanomas tik prisilaikant griežtų sąlygų, t.y. kaitinant laidininkus temperatūriniame diapazone nuo Cu lydymosi temperatūros iki Nb lydymosi temperatūros (1085–2468 °C), o taip pat taikant optimalią energijos koncentraciją, kurios pakanka tik išlydyti Cu matricą.
 - 3.2. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų termitinis suvirinimas yra įmanomas tik taikant termitinį mišinį, kurio adiabatinė (reakcijos) temperatūra turi siekti 2449 °C, o reakcijos metu turėtų būti gaunama iki 85 % Cu, o šlako ne mažiau 15 masės %, kur moliarinis santykis tarp Al ir CaSi₂ 2:1.
 - 3.3. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų lazerinis suvirinimas įmanomas tik taikant impulsinius suvirinimo lazerius, ne ilgesnę nei 1064 nm bangos ilgio spinduliuotę ir galios tankį nuo $3 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ iki $5,9 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, apsaugines dujas ir spinduliuotės atspindžio reiškinį mažinančias priemones.
 - 3.4. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų elektronpluoštis suvirinimas vakuumė įmanomas tik taikant nefokusuotą elektronų pluoštą, galios tankį nuo $3 \cdot 10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ iki $10^3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ir apie 1 kW pluošto galią.
 - 3.5. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų slėginis suvirinimas stipriu magnetiniu lauku yra įmanomas tik naudojant gilzę iš gryo techninio vario, kurios cheminė sudėtis būtų analogiška šio mikrokompozitinio laidininko variniam apvalkalui, taikant didelį užpresavimo greitį (iki 100 m/s) ir didelės galios impulsą.
4. Siekiant įvertinti gautų suvirinimo jungčių technines charakteristikas ir jų kokybę, reikia atlikti eksperimentinius bandymus ir tyrimus, atsižvelgiant į EN 60512, GOST 17441 ir GOST 10434 standartų reikalavimus, skirtus elektrokontaktinėms jungtims.

Apibendrinus literatūros analizę suformuluoti šie spręstini uždaviniai:

1. Apskaičiuoti ar parinkti optimalius suvirinimo technologinius režimus ir medžiagas, atlikti mikrokompozitinių laidininkų sujungimą panaudojant parinktus suvirinimo parametrus;
2. Įvertinti gautų virintinių jungčių kokybę ir struktūrą, svarbiausias eksploatacines (elektrines ir mechanines) savybes;
3. Palyginti skirtingais būdais gautų virintinių jungčių savybes ir atrinkti geresnę sujungimo technologiją bei būtinų pridėtinų medžiagų sudėtį, suvirinimo proceso technologinius parametrus.

Vario ir niobio mikrokompozitinių laidininkų neardomų jungčių sujungimo metodika, darbe taikomi tyrimo metodai ir medžiagos

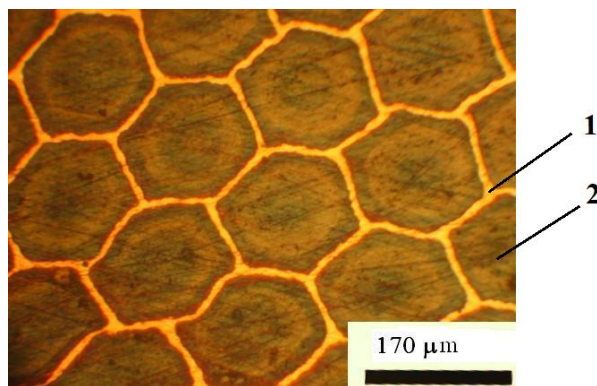
Eksperimentinio tyrimo metodika sudaryta siekiant išsiaiškinti taikytų suvirinimo procesų technologinių parametrų ir suvirinimo medžiagų poveikį Cu-Nb laidininkų virintinių jungčių mikrostruktūrai ir svarbiausioms eksploatacinėms savybėms.

Skyriaus tematika paskelbti 6 autoriaus (su bendraautoriais) straipsniai (Mikalauskas *et al.* 2016; Mikalauskas *et al.* 2016; Mikalauskas *et al.* 2016; Mikalauskas *et al.* 2017; Mikalauskas *et al.* 2018; Mikalauskas *et al.* 2018).

2.1. Naudojami mikrokompozitiniai laidininkai

Tyrimuose buvo taikomas Cu-Nb mikrokompozitas, naudojamas impulsinių magnetų ričių gamybai. Tyrimuose buvo naudojami $2,4 \times 4,2$ mm ir $1,7 \times 0,8$ mm skersmens Cu-Nb (82–18 %) laidininkai, pagaminti „surinkimas-deformacija“ būdu. Nustatyta, kad vario-niobio mikrokompozitas, turintis 18–20 masės %

niobio, pasižymi optimaliomis elektrinėmis ir mechaninėmis savybėmis. Mažinant niobio kiekį prarandamas laidininko mechaninis stiprumas, o padidinus niobio kiekį prarandamas laidų elastingumas ir sumažėja elektros laidumas (Raabe *et al.* 1995). Šio Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko mechaninės savybės: R_e – 830–850 MPa, R_m – 1120 MPa, pailgėjimas A – 4,2 % (Višniakov *et al.* 2011). Šio mikrokompozito struktūra – Nb gijos <15 nm ir vario matrica pateikiama 2.1 paveiksle. Tokio mikrokompozito struktūra yra sudaryta iš Nb pluošto <15 nm ir vario matricos (Rdzawski *et al.* 2015).



2.1 pav. Mikrokompozitinio Cu-Nb laidininko mikrostruktūra:

1 – Cu matrica, 2 – Nb gijos (Višniakov *et al.* 2011)

Fig. 2.1. Microstructure of Cu-Nb microcomposite conductor:

1 – Cu matrix, 2 – Nb fibres (Višniakov *et al.* 2011)

2.2. Termitinio suvirinimo metodika ir medžiagos

Tyrimuose buvo naudojamas 2,4×4,2 mm skersmens Cu-Nb (82–18 %) laidininkas. Termitinio mišinio receptūra buvo parinkta atsižvelgiant į žinomų taikomų vario lydinams termitų sudėtį ir Cu-Nb mikrokompozito sudėtį. Remiantis paskelbtų įvairiuose šaltiniuose tyrimų rezultatais, aukšta adiabatine reakcijos temperatūra 2448,8 °C, geru užsidegimu, puikiu šlako atsiskyrimu pasižymi termitiniai mišiniai, kurių termitinės reakcijos metu gaunamų metalo ir šlako proporcijos yra šios: Cu iki 85 masės %, šlako ne mažiau 15 masės %.

Pagal 1.1 formulę galima apskaičiuoti tinkamas kompozicijas, turinčias pageidaujamą degimo temperatūrą, o taip pat apskaičiuoti adiabatinės reakcijos temperatūrą. Atsižvelgiant į aukščiau įvardintas sąlygas ir sudarytas egzotermines degimo reakcijos lygtis eksperimentams buvo parinktas termitinis mišinys, kuris turi užtikrinti aukštą reakcijos temperatūrą nuo 2448,8 °C iki 2467,8 °C, o reakcijos metu Cu gaunama iki 85 %, šlako ne mažiau 15 masės %, moliarinis

tūris tarp Al ir CaSi_2 2:1. Šio termitinio mišinio sudėtis pateikta 2.1 lentelėje, o termito mišinio frakcijų vaizdas 2.3 paveiksle.

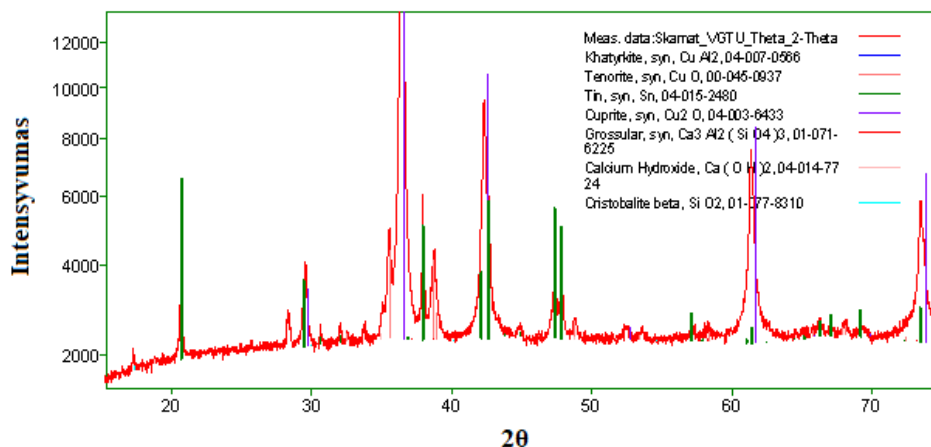
Gaunamos termitinės reakcijos metu metalo ir šlako santykis nustatytas svėrimo būdu, panaudojant analitinės svarstyklės KERN EW620-3NM.

2.1 lentelė. Termitinio mišinio cheminė sudėtis

Table 2.1. Chemical composition of thermite mixture

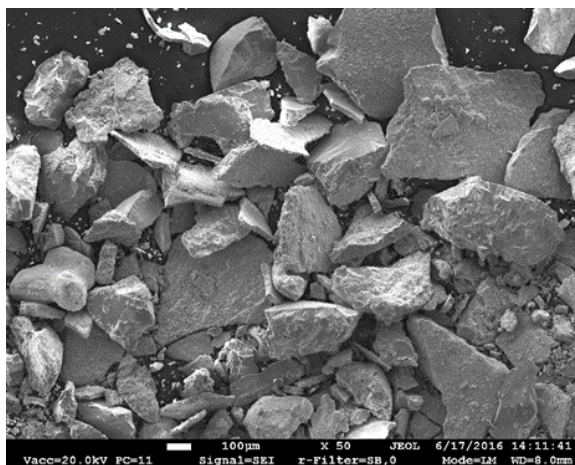
Cheminis elementas	Procentinė dalis, masės %
CuAl_2	8,65
CaSi_2	6,90
Cu_2O	82,0
Sn	2,20
CaF_2	0,25

Paruoštų termitinių mišinių fazinė sudėtis nustatyta rentgeno spindulių difrakcijos analize (2.2 pav.), naudojant rentgeno spindulių difraktometrą SmantLab (Rigaku). Difrakcijos kreivėje lengvai identifikuojami CuAl_2 , SiO_2 , CuO , Cu_2O , Ca_3Al_2 . Tai patvirtina, jog termitinis mišinys atitinka apskaičiuotą pagal 1.1 formulę.



2.2 pav. Termitinio mišinio rentgeno difrakcijos kreivė

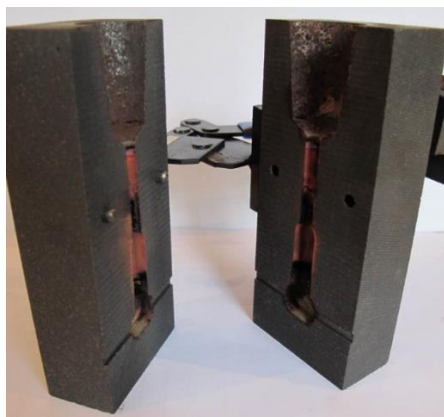
Fig. 2.2. XRD pattern of a thermite mixture



2.3 pav. Termitinio mišinio frakcijų vaizdas

Fig. 2.3. View of the fractions of a thermite mixture

Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų sandūrinės jungties termitiniam suvirinimui (su tarpiniu liejimu) buvo pagaminta speciali ugniai atspari grafitinė forma, kurios bendras vaizdas pateiktas 2.4 paveiksle. Porcija termito, atitinkanti sujungimo tūrį, buvo užpilama į tiglį ir uždegama. Termitui sudegus, tigris užpildomas išlydytu metalu. Kol skystas metalas neišlydė diskinio įdėklo, skystas lydalas spėjo išsisluoksniuoti priklausomai nuo komponentų tankio. Apatinis sluoksnis – skystas metalas, viršutinis – skystas šlakas, kurio sudėtyje lieka pagrinde oksidai. Išsilydžius diskiniam įdėklui, skystas metalas užpildo jungties ertmę, dalinai aplydant ir laidininką, taip suformuojant neardomą jungtį.



2.4 pav. Atidarytos grafitinės formos (tiglio) vaizdas

Fig. 2.4. View of the opened graphite mound

Termitinio mišinio uždegimui buvo naudojama ERICO CADWELD elektrinio uždegimo sistema. Sujungiamų Cu-Nb laidininkų galų paruošimą sudarė sekančios operacijos: laidų tiesinimas, galų nupjovimas ir galų šlifavimas (kad sujungiami paviršiai būtų lygūs ir statmeni laido ašiai), paviršių nuriebalinimas benzine ir džiovinimas (degant riebalams ir kitiems teršalams išsiskiria dujos, kurios trukdo suvirinimo vietos užpildymui skystu metalu, dėl ko atsiranda suvirinimo defektai).

2.3. Lazerinio suvirinimo metodika ir medžiagos

2.3.1. Medžiagos ir naudojama lazerinė įranga

Tyrimui buvo naudojamas Cu-Nb (82 masės % – 18 masės %) mikrokompozitinis laidininkas, kurio skerspjūvio plotas yra $1,7 \times 0,8$ mm. Mikrokompozitinių laidininkų lazeriniam suvirinimui su pridėtiniu metalu (2.2 lentelė) buvo naudojama 0,3 mm skersmens 2.1006 (CuSn_1) suvirinimo viela. Šis pridėtinis metalas turi geresnį mechaninį atsparumą nei grynas Cu laidininkas (2.3 lentelė). Šio pridėtinio metalo elektrinis laidumas yra toks pat kaip ir Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko, kuris yra labai svarbus elektrinėms jungtims. CuSn_1 lydymosi temperatūra yra panaši į Cu-Nb mikrokompozito Cu matricą, todėl pridėtinis metalas bus išlydomas kai bus pridėtas į suvirinimo vonelę ir po kristalizacijos etapo sudarys homogenišką jungtį.

2.2 lentelė. Lazerinio suvirinimo vielų cheminė sudėtis ir mechaninės savybės (masės %)

Table 2.2. Chemical composition and mechanical properties of laser welding wires (wt. %)

Pridėtinio metalo medžiaga	Cu	Fe	Mn	Si	Zn	Sn	Ni	Kiti elementai
Cu	99,99	<0,001			<0,0001			<0,0049
CuSn_1	98,0		<0,25	<0,4		0,8	<0,3	
CuSi_3Mn_1	95,73	0,07	1,0	3,0	0,1	0,1		

2.3 lentelė. Cu lazeriniam suvirinimui pritaikytų suvirinimo vielų savybės (Schwartz 2003)

Table 2.3. The properties of laser-welding wires for Cu alloys laser welding (Schwartz 2003)

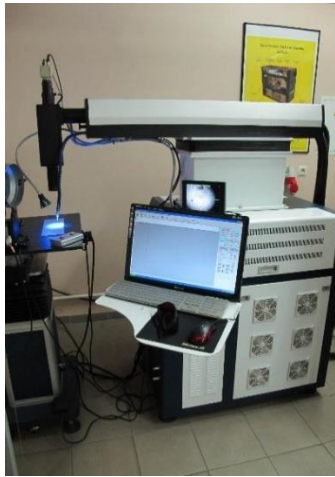
Pridėtinio metalo medžiaga	Kietumas, HBW	Takumo riba R_e , MPa	Stiprumo riba R_m , MPa	Santykinis pailgėjimas A, %	Šiluminis laidumas k , W/m K kambario temperatūroje	Elektrinis laidumas, IACS %	Lydymosi temperatūra, °C
Grynas Cu	≤50	55	<255	25	401	100	1085
CuSn1	60	75	220	30	145	72	1020–1050
CuSi3Mn1	80	120	350	40	35	7	910–1025

Bandinių suvirinimui buvo naudojamas BMM400 CNC lazerinis suvirinimo aparatas su 4D pozicionavimo stalu (2.5 pav.), CCD stebėjimo sistema ir CNC2000 programavimo programine įranga. Šio lazerinio suvirinimo įrenginio 400 W lazerio galia yra pakankama smulkiems Cu lydiniams suvirinti (2.4 lentelė).

2.4 lentelė. BMM400 CNC lazerinio suvirinimo aparato techniniai duomenys (<http://www.boaolaser.com>)

Table 2.4. Technical data of BMM CNC laser-welding machine (<http://www.boaolaser.com>)

Parametras	Reikšmė
Lazerio medžiaga	Nd: YAG
Didžiausia vieno impulso energija, J	150
Maksimali impulso galia, kW	14
Lazerio bangos ilgis, nm	1064
Lazerio dėmės dydis (skersmuo), mm	0,1–3,0
Vidutinė lazerio galia, W	400
Impulso trukmė, ms	0,5–10
Impulso dažnis, Hz	0–20



2.5 pav. Lazerinio suvirinimo aparato BMM400 CNC bendras vaizdas

Fig. 2.5. View of the BMM400 CNC laser welding machine

Suvirinimo metu buvo naudojamas apsauginių dujų mišinys (M13-ArO-3). Apsauginės dujos buvo tiekiamos į suvirinimo sritį 10 mm skersmens vamzdeliu, apsauginių dujų debitas apie 10 l/min. Siekiant sumažinti atspindžio efektą lazerio spindulio kritimo kampas buvo pakeistas ir sudarė 5° nuo paviršiaus normalės.

Ruošiniai buvo standžiai įtvirtinami 3D pozicionavimo staliuke, tarpas tarp detalių ~0,02 cm. Suvirinama buvo be pridėtinių medžiagų ir naudojant suvirinimo vielą. Paskutiniu atveju buvo naudojamas 45° pasvyrimo kampas tarp spindulio ir suvirinimo vielos. Bandiniams iš abiejų pusių suvirinti buvo naudojami suvirinimo režimai, kurie buvo apskaičiuojami pagal 2.3.2 poskyryje pateiktą metodiką.

2.3.2. Lazerinio suvirinimo režimų skaičiavimo metodika

Lazeriniam suvirinimui, impulso režimu, kritinis galios tankis medžiagų lydymuisi ir išgaravimui gali būti apskaičiuotas pagal formulę 2.1 arba 2.2 (Zhou 2008; Angelov 2015; Veiko *et al.* 2014; Parfenov 2011):

$$P_d = \frac{k(T_e - T_0)\sqrt{\pi}}{2A\sqrt{at_p}} \quad (2.1)$$

arba

$$P_d = \frac{\rho(T_e - T_0)ch}{At_p}, \quad (2.2)$$

čia P_d – kritinis galios tankis, W/m^2 ; A – absorbcija $A = (1 - R)$; R – atspindžio koeficientas; k – šiluminis laidumas, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; c – specifinė šiluma, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; a – šilumos difuzija, m^2/s ; T_o – pradinė (kambario) temperatūra, $^{\circ}\text{C}$; T_e – kaitinimo temperatūra (medžiagos lydymosi arba garavimo temperatūra), $^{\circ}\text{C}$; ρ – tankis, kg/m^3 ; t_p – lazerio impulso trukmė, s.

Skaičiavimams reikalingos vario fizikinės savybės pateiktos 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Vario fizikinės savybės (Steen *et al.* 2010)

Table 2.5. Copper physical characteristics (Steen *et al.* 2010)

Garavimo temperatūra, T_e , $^{\circ}\text{C}$	Lydymosi temperatūra, T_m , $^{\circ}\text{C}$	Absorb-cija, A	Atspindžio koefi-cientas, R	Šiluminis laidumas, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ kambario temperatūroje	Temperatūrinis laidis a , m^2/s kambario temperatūroje
2562	1085	0,09	0,91	401	$0,12\cdot 10^{-3}$

Žinant kritinį energijos kiekį, reikalingą medžiagai iššildyti iki lydymosi ar garavimo temperatūros, taip pat galima apskaičiuoti kritinę lazerio spinduliuotės galią pagal formulę 2.3 (Ayoola *et al.* 2017):

$$P_p = P_d S, \quad (2.3)$$

čia S – dėmės plotas, m^2 ; P_d – kritinis galios tankis, W/m^2 ; P_p – kritinė spinduliuotės galia, W .

Dėmės plotas apibrėžiamas pagal formulę 2.4 (Parfenov 2011):

$$S = \frac{1}{4} \pi d^2, \quad (2.4)$$

čia d – dėmės skersmuo, m.

Didžiausias galios tankis priklauso nuo impulso energijos ir spindulio skersmens (Tzeng 2000; Ayoola *et al.* 2017):

$$P_d = \frac{P_p}{S} = \frac{4P_p}{\pi d^2} = \frac{4E_p}{\pi d^2 t_p}, \quad (2.5)$$

čia d – dėmės skersmuo, m; S – plotas, m^2 ; E_p – impulso energija, J; t_p – impulso trukmė, s; P_p – kritinė spinduliuotės galia, W .

Ryšys tarp vieno impulso energijos, vidutinės lazerinės galios ir impulso dažnio apibrėžiamas pagal formulę 2.6 (Tzeng 2000; Xue *et al.* 2017):

$$E_p = \frac{P_m}{f}, \quad (2.6)$$

čia E_p – vieno impulso energija, J; P_m – vidutinė lazerio galia, W; f – impulsų dažnis, Hz.

Kritinė galia yra labai svarbus parametras, kuris reikalingas norint įveikti suvirinamos medžiagos atspindžio efektą ir šiluminį laidumą. Kritinę galią galima nustatyti pagal formulę 2.7 (Tzeng 2000; Xue *et al.* 2017):

$$P_p = \frac{E_p}{t_p}, \quad (2.7)$$

čia P_p – kritinė galia, W; E_p – vieno impulso energija, J; t_p – impulso trukmė, s.

Vidutinę lazerio galią galima apskaičiuoti pagal formulę 2.8 (Tzeng 2000):

$$P_m = E_p f = \frac{E_p t_p}{t_p t_f} = P_d C_d, \quad (2.8)$$

čia E_p – vieno impulso energija, J; f – impulsų dažnis, Hz; t_p – impulso trukmė, s; t_f – trukmė tarp impulsų, s; C_d – darbo ciklas.

Impulso dažnis impulsinio suvirinimo metu naudojant Nd:YAG lazerį nustatomas atsižvelgiant į suvirinimo greitį. Impulsų dažnis, dėmės skersmuo, ir suvirinimo greitis turi būti pastovūs norint gauti kokybiškas siūles.

Optimalų suvirinimo greitį galima apskaičiuoti pagal formulę 2.9 (Laser welding fundamentals 2016):

$$v = d(1 - P_{er} / 100)f, \quad (2.9)$$

čia v – suvirinimo greitis, mm/s; d – lazerio dėmės skersmuo, mm; P_{er} – dėmių persidengimo koeficientas, %; f – impulso dažnis, Hz.

Standartinis lazerinio suvirinimo jungčių persidengimo koeficientas apie 70–80 %. Didėjant persidengimo koeficientui įvirinimas priartinamas iki maksimalaus gylio. Priklausomybė tarp pulso dažnio, dėmės skersmens, suvirinimo greičio ir persidengimo koeficiento apibrėžta formulėje 2.10 (Katayama 2013):

$$P_{er} = 100 \frac{d - \frac{v}{f}}{d}, \quad (2.10)$$

čia P_{er} – dėmės persidengimo koeficientas, %; d – lazerio dėmės skersmuo, mm; v – suvirinimo greitis, mm/s; f – impulso dažnis, Hz.

Šiuo metu yra daug skirtingų lazerinio suvirinimo įvirinimo gylio skaičiavimo metodų, keletas jų yra apžvelgiami šaltiniuose (Walsh 2002,

Xue *et al.* 2017). Dažniausiai suvirinimo siūlės plotis arba įvirinimo gylis gali būti preliminariai nustatomas pagal formulę 2.11 (Parfenov 2011):

$$Z = \sqrt{at_p}, \quad (2.11)$$

čia Z – suvirinimo siūlės plotis arba įvirinimo gylis, m; a – temperatūrinis laidumas, m^2/s ; t_p – lazerio impulso trukmė, s.

2.4. Elektronpluoščio suvirinimo metodika

2.4.1. Medžiagos ir elektronpluoščio suvirinimo įranga

Tyrimui buvo naudojami vario-niobio (18 masės % niobio) mikrokompozitiniai laidininkai, kurių skerspjūvis – $2,4 \times 4,2$ mm. Vario-niobio mikrokompozitinių laidininkų suvirinimas buvo atliktas modernia žemos įtampos elektronų pluošto suvirinimo įranga, kurią sudaro N<A–15 maitinimo blokas ir AB 400 difuzinis siurblys 2.6 lentelė.



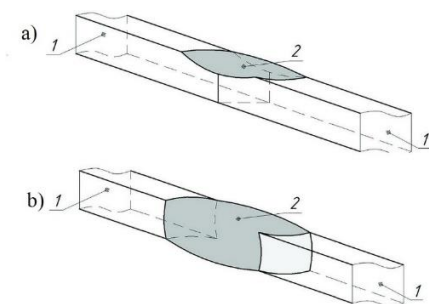
2.6 pav. Elektronpluoščio suvirinimo įrenginio bendras vaizdas
Fig. 2.6. General view of electron beam welding machine

2.6 lentelė. Elektronpluoščio suvirinimo įrangos charakteristikos (Frolov 2002)

Table 2.6. Characteristics of electron beam welding equipment (Frolov 2002)

Parametras	Reikšmė
Greitinimo įtampa, kV	60
Elektronų pluošto galia, kW	15
Elektronų pluošto srovė, mA	0,5–250
Darbinis atstumas, mm	40–200
Fokusavimo įtampa, mA	400–1000
Kameros tūris, m ³	3,5
Vakuomo slėgis, Pa	$3 \cdot 10^{-3}$

Mikrokompozitinių Cu-Nb laidininkų suvirinimo schema elektronų pluoštu pateikta 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Elektronpluoščio suvirinimo schema: a) suvirinimo pradžia; b) suvirinimo proceso pabaiga; 1) suvirinimo bandiniai; 2) suvirinimo vonelė

Fig. 2.7. Electron beam welding scheme: a) start of welding; b) end of welding; 1) weld samples; 2) welding bath

Bandiniai buvo šildomi tol, kol susiformavo suvirinimo vonelė. Eksperimente buvo taikomi sekantys suvirinimo parametrai: greitinimo įtampa – 60 kV, elektronų pluošto srovė – 16 mA, pluošto galia ~1 kW, fokusavimo srovė ~955 mA, pluošto galia – 1 kW, dėmės skersmuo 2,4 mm.

2.4.2. Elektropluoščio suvirinimo režimų skaičiavimo metodika

Elektronpluoščio suvirinimo energijos balansas yra artimas lankinio suvirinimo balansui. Todėl elektronų pluošto parametrai analogiškai susiję su suvirinimo parametrais ir tokia analogija gali būti suformuluota kaip lygtis. Svarbiausi elektronpluoščio suvirinimo parametrai, kuriuos galima keisti – elektronų pluošto galia, greitinimo įtampa, elektronų pluošto srovė ir dėmės skersmuo. Minimalią

elektronų pluošto galią P_{\min} , kuri reikalinga vario-niobio laidininko suvirinimui, galima nustatyti pagal lygtį (RD 24.949.04-90 1990):

$$P_{\min} > ksv, \quad (2.12)$$

čia P_{\min} – minimali elektronų pluošto galia, kW; S – vario-niobio laidininko skerspjūvio plotas, mm²; v – suvirinimo greitis, mm/s; k – galios konstanta, kW·s/mm³.

Šiuo atveju minimalus elektronų pluošto srautas, reikalingas vario-niobio mikrokompozitinio laidininko suvirinimui, yra apie 1 kW. Suvirinimo kokybė priklauso nuo elektronų pluošto galios arba energijos srauto tankio, elektronų pluošto dėmės skersmens bei kitų kintamųjų, naudojamų suvirinimo technologijos aprašymui (Sandstrom *et al.* 1970).

Los Alamos laboratorijos patirtis rodo, kad egzistuoja energijos srauto tankio riba, kurią viršijus, suvirinamuose paviršiuose atsiras nelygumų ir pernelyg didelių išsišakojančių defektų (Sandstrom *et al.* 1970). Todėl galios tankį, sukoncentruotą ant ruošinio ir ruošinio absorbuotą galios tankį galima naudoti norint įvertinti kaitinimo elektronų pluoštu efektą.

Daugumai metalo lydinių lydymui pakanka maždaug 10³ W/cm² energijos srauto tankio. Esant mažesniai nei šis energijos srauto tankis, galima tikėtis, kad metalas nesilydys dėl intensyvaus šilumos nuvedimo. Didelis energijos srauto tankis 10⁶ W/cm²–10⁷ W/cm² per kelias mikrosekundes sukels daugelio metalų garavimą ir joks jungimas tokiu atveju negali įvykti (Elmer *et al.* 1990):

$$G = \frac{P_{\min}}{A} = \frac{(U \times I)}{A}, \quad (2.13)$$

čia P_{\min} – minimali elektronų pluošto galia, W; A – elektronų pluošto dėmės plotas, cm²; I – elektronų pluošto srovė, mA; U – greitinimo įtampa, kV.

Vidutinis galios tankis E (sunaudojamos energijos kiekis vieneto plote ant ruošinio paviršiaus) gali būti apibrėžtas pagal 2.14 lygtį (Elmer *et al.* 1990):

$$E = \frac{P_{\min}}{\varphi \times v} = \frac{U \times I}{\varphi \times v}, \quad (2.14)$$

čia P_{\min} – mažiausia elektronų pluošto galia, W; I – elektronų pluošto srovė, mA; U – greitinimo įtampa, kV; φ – elektronų pluošto dėmės skersmuo, mm; v – suvirinimo arba darbo greitis, mm/s.

Šilumos sąnaudos Q apskaičiuojamos pagal 2.15 lygtį (Maak 1984; Maak 1985):

$$Q = \frac{U \times I}{v}, \quad (2.15)$$

čia I – elektronų pluošto srovė, mA; U – greitinimo įtampa, kV; v – suvirinimo arba darbinis greitis, cm/s.

Metalo lydiniams pakankamus elektronų pluošto parametrus galima keisti diapazone: 1–10 mm elektronų pluošto skersmuo, $10\text{--}10^3$ W/cm² energijos srauto tankis, $10\text{--}10^2$ W elektronų pluošto galia (Rikalin *et al.* 1978).

Suvirinimui tinkami elektronų pluošto parametrai turi būti pateiktame diapazone: $5\text{--}10^{-2}$ mm dėmės skersmuo, $10^5\text{--}10^3$ W/cm² energijos srauto tankis, $10^2\text{--}10^4$ W elektronų pluošto galia (Rikalin *et al.* 1978).

Rekomenduojamą elektronų pluošto dėmės skersmenį, atsižvelgiant į taikomą srauto galią, energijos srauto tankį ir greitinimo įtampą, galima apytiksliai gauti iš nomogramos (Rikalin *et al.* 1978). Dėmės skersmuo turėtų būti apie 4 mm, kai elektronų pluošto galia yra apie 1 kW, o greitinimo įtampa – 60 kV. Elektronpluoščio suvirinimo parametrus galima pasirinkti ir empiriniu būdu, priklausomai nuo reikalingo suvirinimo gylio.

Elektronų pluošto dėmės skersmuo lemia energijos srauto tankį, kuris yra labai svarbus veiksnys elektronpluoščiame suvirinime (Johnson 1970). Daug tyrėjų tirdavo kokią poveikį elektronpluoščio suvirinimo parametrai turi įvirinimo gyliui (Hicken *et al.* 1991). Pirmosios matematinės lygtys, apibrėžiančios ryšį tarp įvirinimo gylio iš suvirinimo parametrų, buvo sukurtos 1965 m. (Johnson 1970; Hashimoto *et al.* 1967). Šios lygtys buvo pagrįstos eksperimentiniais rezultatais, gautais naudojant 1,5 kW elektronpluoščio suvirinimo įrenginį, taikant 30–50 kV greitinimo įtampą. Šiame darbe vykdytų suvirinimo eksperimentų sąlygos yra labai panašios. Įvirinimo gyliui apskaičiuoti gali būti taikoma 2.16 lygtis (Johnson 1970; Hashimoto *et al.* 1967):

$$H = k \times U^{1,7} \times I \times \frac{1}{0,8 \times \varphi}, \quad (2.16)$$

čia H – įvirinimo gylis, mm; k – medžiagos konstanta; U – greitinimo įtampa, kV; I – elektronų pluošto srovė, mA; φ – elektronų pluošto dėmės skersmuo, mm.

Šioje lygtyje neatsižvelgiama į neišvengiamus elektronų pluošto dėmės skersmens pokyčius proceso eigoje (Johnson 1970).

Šiuo metu sunku tiksliai nustatyti spindulio dėmės dydį, tad bendroji lygtis tampa nepraktiška. Nustatytas spindulio dėmės dydis gali skirtis priklausomai nuo operatoriaus ir nuo mašinos. Suvirinimo gylis gali varijuoti iki 40 %, priklausomai nuo rankinio fokusavimo, kurį atlieka skirtingi operatoriai (Giedth *et al.* 1988). Todėl šis pluošto fokusavimo ir dėmės skersmens nustatymo metodas yra labai subjektyvus.

Gali būti taikomi ir kiti metodai (įdubos matavimo arba rotaciniai metodai) ir zondiniai įrenginiai su jutikliais arba skeneriais ar kita speciali įranga, skirta matuoti elektronų pluošto srovę. Prekyboje esančios zondavimo sistemos skiriasi pagal skiriamąją gebą, technines savybes ir taikymo sritį (Khokhlovsky

et al. 2011). Akivaizdu, kad tokie metodai yra sudėtingi ir brangūs dėl jautiklių ar sudėtingos matavimo įrangos projektavimo poreikio, tad taikomi tik laboratorinėmis sąlygomis.

Įvairios empirinės lygtys, baigtinių elementų metodas (angl. FEM), elektronpluoščio suvirinimo dvimačiai ir trimačiai modeliai sukurti įvirinimo gyliui prognozuoti. Tačiau juose nėra atsižvelgiama į realiomis sąlygomis neišvengiamą dėmės skersmens pokyčio poveikį įvirinimui.

Šiuo atveju išvesties parametrai (įvirinimo gylis arba suvirinimo siūlės plotis) priklauso nuo įvairių veiksnių, pvz. elektronų pluošto galios, elektronų pluošto srovės, greitinimo įtampos, suvirinimo greičio, fokusavimo srovės, elektronų pluošto fokusavimo vietos, vakuuminio slėgio ir virinamos medžiagos. Patobulinta empirinė lygtis, skirta prognozuoti vario lydinių įvirinimo gylį, pateikta 2.17 lygyje:

$$H = 0,003 \times \frac{U^{-1,58} \times I^{0,64}}{v^{0,42}}, \quad (2.17)$$

čia H – įvirinimo gylis, mm; I – elektronų pluošto srovė, mA; U – greitinimo įtampa, kV; v – suvirinimo greitis, mm/s; k – medžiagos konstanta, kur dėmės skersmuo nebuvo įvertinamas ir matuojamas (lygus 0,003).

Gali būti taikomos ir kitos lygtys įvirinimo gylio (lygtis 2.18) ir suvirinimo pločio (lygtis 2.19) skaičiavimui, kai buvo išlaikyta pastovi fokusavimo srovė (Munteanu *et al.* 2009):

$$H = -144,143 \text{ mm} + 0,137 \frac{\text{mm}}{\text{mA}} \times I - 26,346 \text{ s} \times v + 0,218 \frac{\text{mm}}{\text{mA}} \times F; \quad (2.18)$$

$$B = -57,17 \text{ mm} + 0,0135 \frac{\text{mm}}{\text{mA}} \times I - 6,731 \text{ s} \times v + 0,092 \frac{\text{mm}}{\text{mA}} \times F, \quad (2.19)$$

čia H – įvirinimo gylis, mm; B – jungties plotis, mm; I – elektronų pluošto srovė, mA; F – fokusavimo srovė, mA; v – suvirinimo greitis, mm/s.

Santykiškai dideli skirtumai tarp prognozuojamų ir išmatuotų įvirinimo gylių demonstruoja, kad dėmės skersmens ir elektronų pluošto galios pokyčiai iš tikrųjų daro didelį poveikį gaunamam vario lydinių siūlių įvirinimo gyliui. Kadangi nėra labai tikslių matematinių išraiškų prognozuoti vario ir kitų sunkiųjų metalų lydinių įvirinimo gylį ir optimalų dėmės skersmenį, tai praktikoje dažniausiai nustatoma eksperimentiniu būdu (Pilarczyk *et al.* 2014, Burgardt *et al.* 1992).

Šiame darbe optimalus plono vario ir niobio laidų suvirinimo dėmės skersmuo buvo apskaičiuojamas ir tikslinamas eksperimentiškai. Dėmės skersmuo buvo keičiamas nuo 0,3 mm iki 5 mm, nukreipiant elektronų pluoštą į gaminį ir įvertinant paveiktos srities geometrinius parametrus.

Suvirinimo jungties K formos koeficientas ir μ suvirinimo zonos pilnumo santykis skerspjūvyje apibrėžia suvirinimo jungties formą. Šie elektronpluoščio suvirinimo siūlės parametrai gali būti apskaičiuojami pagal 2.20 ir 2.21 lygtis (Rikalin *et al.* 1978):

$$K = \frac{H}{B} < 1; \quad (2.20)$$

$$\mu = \frac{s}{H \times B} = 0,8, \quad (2.21)$$

čia s – vario-niobio mikrokompozitinio laidininko skerspjūvio plotas, mm^2 ; H – įvirinimo gylis, mm ; B – suvirinimo siūlės plotis, mm .

2.5. Slėginio suvirinimo stipriu magnetiniu lauku metodika ir medžiagos

Tyrimuose buvo naudojamas $2,4 \times 4,2$ mm Cu-Nb mikrokompozitinis laidininkas. Presuotos jungties formavimui buvo taikoma gilzė iš gryno techninio vario, kurios cheminė sudėtis analogiška šio mikrokompozitinio laidininko variniam apvalkalui. Cu-Nb magnetinis presavimas buvo atliktas naudojant eksperimentinę impulsinę sistemą, kuri sudaryta iš aukštos įtampos (iki 5,5 kV) iškrovos bloko (impulso galia iki 6,8 kJ) ir bandinio induktoriaus (Fizikos technikos institutas, Nacionalinė Baltarusijos mokslų akademija). Eksperimentų metu panaudoti parametrai pateikti 2.7 lentelėje.

2.7 lentelė. Impulsinės magnetinės sistemos techninės charakteristikos

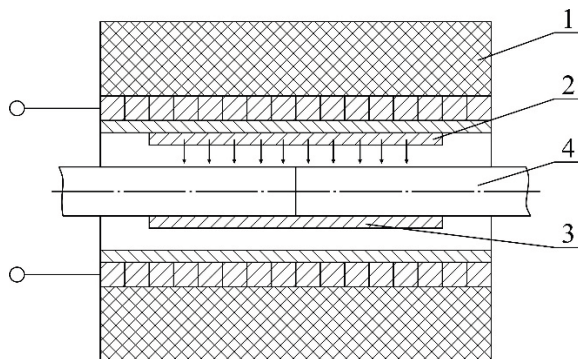
Table 2.7. Technical characteristics of pulsed magnetic system

Parametras	Reikšmė
Didžiausioji sukaupioji energija, kJ	6,8
Didžiausioji impulso energija, kJ	6,8
Didžiausioji įkrovimo galia, kW	5,5
Įkrovimo talpa, μF	450
Pakrovimo bloko vidutinė išieigos srovės galia, VA	500
Tarimoji galia, VA	3000
Vienfazė įtampa, V	220
Impulsų kiekis, min	2

Impulsams formuoti taikomi kondensatoriai ($450 \mu\text{F}$) buvo iškraunami per induktorių. Iškrovimo laiko ir impulsinės srovės valdymas leido kontroliuoti

bandinių suspaudimo procesą (t. y. taikomą energiją), kad užtikrinti kokybišką jungties formavimą. Jungties užpresavimas buvo atliktas naudojant plonasienio vamzdžio apvalkalą (vario vamzdžio) radialinį spaudimą, kuris buvo užmautas ant mikrokompozitinio laidininko sujungiamų galų. Impulsinis magnetinis laukas viduje induktoriaus sukėlė staigią varinio vamzdžio deformaciją (iki 100 m/s) aplink jungiamus laidininko galus. Tai leido sudaryti stiprią ir tvirtą dviejų laidų jungtį kietame būvyje.

Užpresavimo magnetiniu lauku technologijos ir bandinio padėties prieš ir po presavimo schema pateikta 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Užpresavimo magnetiniu lauku technologijos schema:

1 – induktorius; 2 – cilindrinis apvalkalas presavimui;

3 – cilindrinis apvalkalas po presavimo; 4 – sujungiami laidai

Fig. 2.8. Schematic of the magnetic pressing technology, where:

1 – inductor; 2 – tubular sheath for pressing; 3 – tubular sheath after pressing;

4 – conductors, which are being connected

2.6. Virintinių jungčių savybių analizės metodikos

2.6.1. Optinės mikroskopijos metodika

Siūlių mikroskopinis ir makroskopinis tyrimas atliktas remiantis standartais EN ISO 17639 ir EN 60512-1-1. Bandiniai optinei mikroskopijai paruošti naudojant epoksidinę dervą, užpilant bandinius formose. Bandinių pjovimui naudotos Buehler „AbrasiMet“ pjovimo staklės, poliravimui Buehler „Beta“ poliravimo įrenginys. Užbaigiamasis poliravimo etapas atliktas su deimantinėmis pastomis „ERNST Winter & Sohn“, kurių grūdėtumas 1, 3, 5 μm ant specialių poliravimo diskelių „Bergman & Beving Lab“. Poliruoti šlifai papildomai plauti ultragarsinėje vonelėje „Bandelin Sonorex“ RK-521, 8 l talpos ir valomi etilo alkoholiu, vėliau džiovinti karšto oro srove. Jungčių struktūra buvo tiriama po

poliravimo ir ėsdinimo. Ėsdikliai makroskopiniam ir mikroskopiniams tyrimui parinkti remiantis CEN ISO/TR 16060 techniniu reglamentu. Ėsdinimui panaudotas $\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ tirpalas: 10 g geležies trichlorido, 20 ml druskos rūgšties, 25 ml vandens. Suvirintos jungties mikrostruktūra ir perėjimo zona buvo tiriama optinės mikroskopijos metodu (didinimas iki $\times 1500$), panaudojant optinį metalografinį mikroskopą „Nikon Eclipse MA200“ su integruota vaizdo kamera ir programiniu nuotraukų apdorojimo paketu.

2.6.2. Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos metodika

Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos (SEM) tyrimai atlikti VGTU Statybinių medžiagų institute. Virintinių jungčių mikrostruktūrai ir perėjimo zonos tyrimams buvo taikomas mikroskopas JEOL JSM-7600 su energijos dispersijos spektrometru „Oxford INCA EnergyX – Max20“ (EDS) cheminei mikroanalizei atlikti. Paruoštų virintinių jungčių mikrostruktūra (didinimas iki $\times 100\,000$) buvo tiriama tiek išilginiuose, tiek skersiniuose skerspjuvniuose. Skirtingais suvirinimo metodais suvirinti bandiniai tirti SEM pirminių ir antrinių elektronų režimuose, taikant mikroanalizės sistemą. Bandinių paviršius buvo specialiai paruoštas. Jungčių struktūra buvo tiriama po poliravimo. Visų poliruotų ir ėsdintų bandinių paviršius prieš mikroskopinę analizę buvo papildomai valomas ultragarsinėje vonelėje „Bandelin Sonorex“ EK-52, siekiant pašalinti įvairius paviršiaus teršalus po poliravimo ir ėsdinimo. Prieš mikroskopinę analizę tiriami paviršiai atskirais atvejais buvo papildomai padengiami vakuuminio garinimo būdu 40 nm storio grafitine danga, siekiant padidinti elektrinį laidumą. Padengimas šia danga buvo vykdomas garinant anglies elektrodą 30 min. SEM tyrimų tipiniai parametrai: 25 kV greitinančioji įtampa, 45 μA emisijos srovė, 16 mm atstumas iki bandinio paviršiaus.

2.6.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizės metodika

Termininio mišinio fazinė analizė atlikta naudojant rentgeno spindulių difraktometrą „SmartLab Rigaku“ su 9 kW besisukančio Cu anodo rentgeno spindulių vamzdžiu. Rentgeno spindulys į bandinio paviršių krito 0,5 laipsnio kampu, difrakcijos kampo 2θ intervalas: 15–80°, nuskaitymo žingsnis – 0,02°, detektoriaus judėjimo greitis 1 °/min, temperatūra 25 °C.

Analizės rezultatai buvo pateikiami rentgenogramose – kreivėse, kuriose pavaizduotos atsispindėjusių rentgeno spindulių intensyvumo priklausomybės nuo detektoriaus kampo. Fazių identifikavimas atliktas dešifruojant rentgenogramas su specializuota programine įranga. Analizei naudota PDF-4+ (2013) kristalinių junginių duomenų bazė.

2.6.4. Jungčių stipruminių savybių analizė

Suvirintų jungčių mechaninės savybės buvo nustatytos atliekant tempimo bandymus pagal EN 61788-21, EN 61788-6, EN IEC 60512-1, EN 60512-8-2 standartus. Kiekvienam suvirinimo metodui ir suvirinimo režimui buvo išbandyti trys bandiniai su suvirintomis sandūrinėmis jungtimis. Kiekvienai serijai bandinių buvo apskaičiuoti gautų tempimo įtempių ir pailgėjimo reikšmių vidurkiai.

Tempimo bandymui buvo naudojamas universalus tempimo presas TIRAtest 2300 su kompiuterine matavimo sistema (2.9 pav.), analoginiu skaitmeniniu keitikliu Spider-8 su duomenų registravimu, operacine programine įranga „Katman-Express“ ir dinamometrai iki 20 kN ir iki 100 kN (tikslumas 0,5 %).



2.9 pav. Tempimo bandymų įrangos bendras vaizdas
Fig. 2.9. General view of the tensile testing equipment

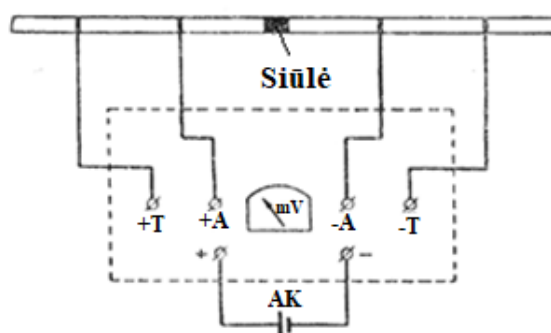
Suvirintų bandinių ilgis pagal standartus GOST 17441, GOST 6996 ir ISO 4136, turėtų viršyti 150 mm. Eksperimentų metu bandinių ilgis siekė 300 mm. Magistralinių elektros linijų kontaktinės jungtys turi atlaikyti mechanines apkrovas, siekiančias 90 % nuo laidininko stiprumo ribos. Elektrokontaktinės jungtys, kurios nebūna papildomai apkraunamos, turi atlaikyti apkrovas ne mažiau kaip 30 % nuo laidininko stiprumo ribos.

2.6.5. Jungčių elektrinių savybių tyrimų metodika

Suvirintos jungtys buvo išbandytos pagal standarte aprašytą metodiką (EN 60512-9-2, EN 60512-2-1, GOST 17441; GOST 10434). Pagal GOST 10434

standartą, laidininko bandinio elektrinis atsparumas ir bandinių suvirintų elektronų pluoštu skirtumas neturėtų viršyti 1,5 karto.

Siekiant įvertinti elektrinę varžą, kiekvienu atveju buvo imami trys vario-niobio laidininkų fragmentai su suvirintomis sandūrinėmis jungtimis. Kiekvienas bandinys 300 mm ilgio. Bandinių su jungtimis ir laidininkais elektrinę varžą buvo matuojama keturių zondų metodu, naudojant skaitmeninį matuoklį LCR (Digital LCR Meter) U2810D pagal 2.10 paveiksle pateikta schemą.



2.10 pav. Suvirintos jungties elektrinės varžos matavimo schema

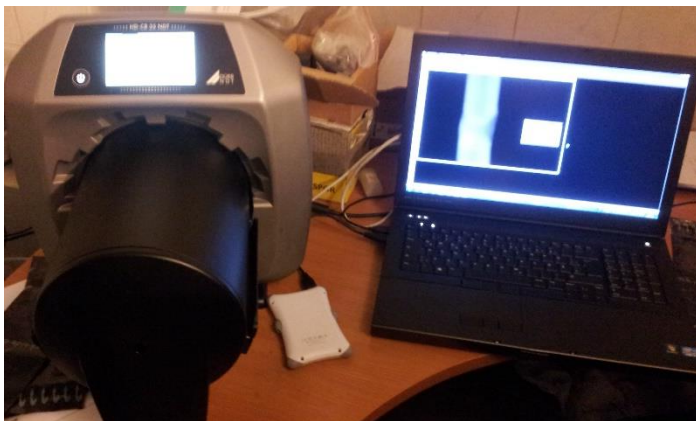
Fig. 2.10. Scheme for measuring electrical resistance of a welded joint

Jungties ir laidininko įkaitimo (Džaulio šildymo efekto) skirtumas praleidžiant elektros srovę įvertintas eksperimentaliai panaudojant suvirinimo lygintuvą VDU-305 ir termovizorių Flir E49001. Temperatūros skirtumas laidininko srityje ir suvirinimo jungtyje tekant nominaliai srovei turi būti mažesnis nei 95 °C. Temperatūros pasiskirstymas buvo fiksuojamas eksperimento pradžioje ir kas 30 s kaitinimo metu.

Laidininko su suvirinta jungtimi bandiniai buvo kaitinami 200 A elektros srove, kaitinimo trukmė 2 min. Elektros linijose naudojamų varinių laidininkų skersmuo yra apskaičiuojamas remiantis sąlyga, kad srovės tankis neturi viršyti 8 A/mm². Elektrinių transformatorių apvijų skaičiavimai yra pagrįsti sąlyga, kad srovės tankis neturi viršyti 3 A/mm². Pagal standartą GOST 17441, 10 mm² skersmens vario laidų jungčių kaitinimas turi būti išbandytas naudojant nominalią srovę 86 A, pvz., esant srovės tankiui 8,6 A/mm². Eksperimentų metu buvo pasiektas 20 A/mm² srovės tankis, gerokai viršijantis standartuose nustatytas ir praktiškai taikomas vertes. Tokia didelė elektros srovė buvo taikoma apgalvotai, kad būtų užtikrinta, kad šio eksperimento sąlygos būtų arčiau darbo režimui didelės galios impulsiniuose magnetuose.

2.6.6. Jungčių neardomosios kontrolės metodika

Siekiant įvertinti virintinių jungčių kokybę buvo atlikti neardomieji bandymai, remiantis standartu EN ISO 17636-1. Bandymams buvo panaudotas „GE ERESO 42MF4“ radiografinis įrenginys ir „Durr NDT“ HR-CR35 juostų skeneris su skaitmeninės radiografijos programine įranga „D-test viewer 9.3“ (2.11 pav.).



2.11 pav. Skaitmeninės radiografijos komplekso bendras vaizdas
Fig. 2.11. General view of the digital radiography complex

Tyrimuose buvo taikoma 1 kontrolės schema, C5 klasės rentgeno juosta pagal standartą ISO 11699-1, kokybės indikatorius IQI W 18 pagal standartą ISO 19232-1, fokusinis atstumas 300 mm, šaltinio įtampa 90 kV, spinduliuotės trukmė 4 s.

2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų termitinio mišinio sudėtis ir suvirinimo metodika, užtikrinanti aukštą termitinio mišinio reakcijos adiabatinę temperatūrą (siekiančia 2468 °C), ir tinkamą gryno vario ir šlako santykį po egzoterminės reakcijos (vario ne mažiau 76 masės %, šlako ne mažiau 24 masės %, leidžia sujungti Cu-Nb mikrokompozitinius laidininkus su tarpiniu liejimu).
2. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų lazerinio suvirinimo metodika, užtikrinanti suvirinimo srities apsaugą nuo supančios aplinkos ir lazerio galios tankį nuo $3 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ iki $5,9 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ taikant 1064 nm bangos

ilgio spinduliuotę ir mažinančias spinduliuotės atspindžio reiškinių priemones leidžia sujungti Cu-Nb mikrokompozitinius laidininkus.

3. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų elektronpluoščio suvirinimo metodika, užtikrinanti suvirinimo srities apsaugą vakuume, galios tankį nuo $3 \cdot 10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ iki $10^3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ir apie 1 kW pluošto galią taikant nefokusuotą elektronų pluoštą leidžia sujungti Cu-Nb mikrokompozitinius laidininkus.
4. Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų slėginio suvirinimo stiprių magnetiniu lauku metodika, užtikrinanti didelį užpresavimo greitį (iki 100 m/s) ir didelį galios impulsą, užpresuojant gilzę iš gryno techninio vario, kurios cheminė sudėtis analogiška šio mikrokompozitinio laidininko variniam apvalkalui, leidžia sujungti Cu-Nb mikrokompozitinius laidininkus.
5. Sujungtų Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų jungčių fizikinių ir mechaninių savybių nustatymui panaudoti standartiniai bandymų metodai pagal galiojančius standartų EN 60512, GOST 17441 ir GOST 10434 reikalavimus, kurie skirti elektrokontaktinėms jungtims.
6. Radiografinės, optinės, nuskaitančiosios mikroskopijos, rentgeno spindulių difrakcijos XRD analizės metodai leidžia ištirti sujungtų Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų struktūrų pokyčius ir kokybę.

Vario ir niobio mikrokompozitinių laidininkų virintinių jungčių savybių tyrimai ir mikrostruktūros analizė

Skyriuje pateikiami ir analizuojami įvairiais metodais suvirintų jungčių mikrostruktūros, elektrinių ir mechaninių savybių tyrimo rezultatai. Skyriaus tematika paskelbti septyni autoriaus straipsniai su bendraautoriais (Višniakov N., Mikalauskas G. *et al.* 2017; Višniakov N., Mikalauskas G. *et al.* 2018; Višniakov N., Mikalauskas G. *et al.* 2018; Višniakov N., Mikalauskas G. *et al.* 2019).

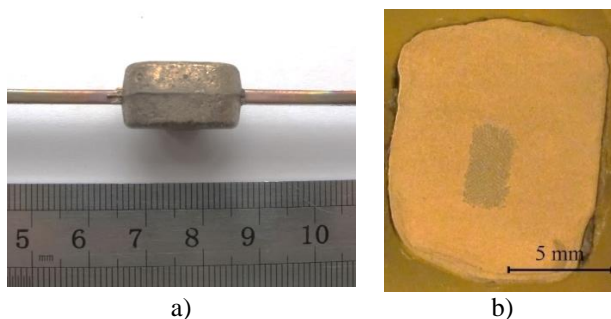
3.1. Termitinio mišinio sudėties įtakos suvirinimo jungčių struktūrai ir savybėms tyrimo rezultatai

Bendras termitinio suvirinimo sandūrinių jungčių vaizdas parodytas 3.1 paveiksle. Matoma, kad Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko galai yra suvirinti taikant termitinį mišinį (3.1 a pav.). Termitinio suvirinimo jungties forma atkartoja grafitinės formos ertmės geometriją, suvirinimo jungties gabaritiniai matmenys $10 \times 12 \times 18$ mm (po šlako pašalinimo). Suvirinimo siūlės skerspjūvis apie ~ 100 mm². Siūlės skerspjūvyje nepastebėta neleistinų makro defektų (plyšių,

porų, tarpų ir pan.) (3.1 b pav.). Taip pat matyti, kad laidininko kompozitinė struktūra ir forma nėra pažeista.

Termitinio suvirinimo jungčių kokybė buvo vertinama atliekant radiografinę neardomąją kontrolę (3.2 pav.). Suvirintose jungtyse nebuvo aptikta neleistinų suvirinimo defektų. Tuštumos ir kiti liejimo defektai yra stebimi tik šalinamoje po suvirinimo dalyje (gurgutyje ir šlako sluoksnyje). Tai rodo, kad pasirinkta termitinio mišinio kompozicija yra tinkama kokybiškoms jungtims suvirinti.

Po termitinio mišinio reakcijos buvo gauta ~76 masės % Cu ir ~24 masės % šlako. Atlikus XRD analizę (3.3 pav.) matyti, kad šlako sudėtis atitinka $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ sistemą, kurios sudėtis ir sudedamųjų proporcija apibrėžta lygtyje 1.1. Difrakcijos kreivėje lengvai identifikuojami CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ir $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. Tai patvirtina, jog termitinės reakcijos metu suformuojamas amorfinis-kristalinis šlakas (anortitas), kurio lydymosi temperatūra 1550 °C.



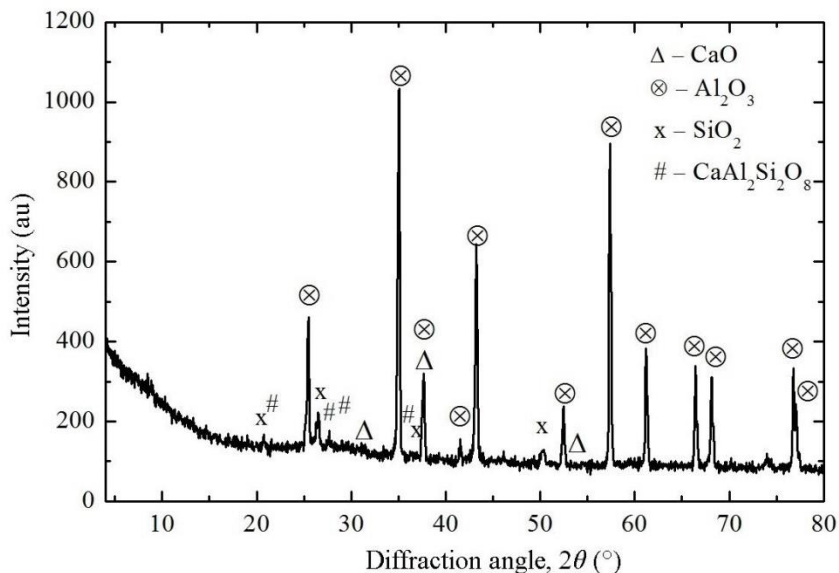
3.1 pav. Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko termitinio suvirinimo jungtis:
a) bendras vaizdas; b) jungties skerspjūvis

Fig. 3.1. Thermite welded joint of Cu-Nb microcomposite conductor:
a) general view; b) the cross-section of the joint



3.2 pav. Termitinės jungties vaizdas atlikus radiografinę kontrolę

Fig. 3.2. Radiographic control view of a thermite joint



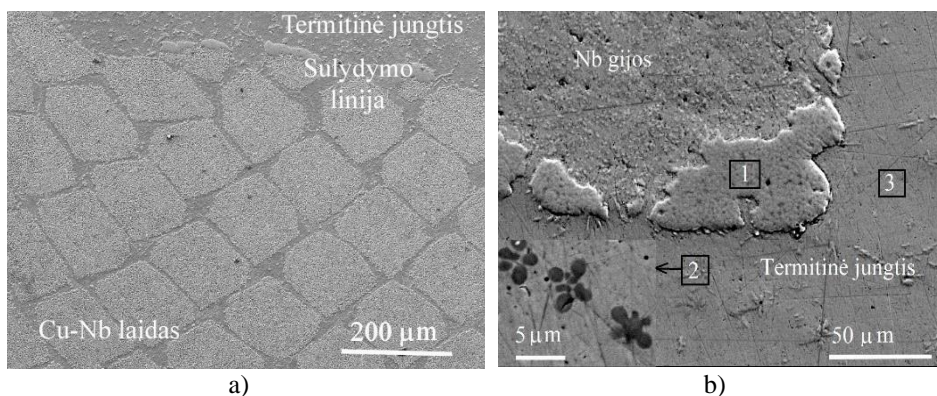
3.3 pav. Šlako XRD kreivė

Fig. 3.3. Slag XRD curve

Termitinio suvirinimo jungties mikrostruktūra pateikta 3.4 paveiksle. 3.4 a paveiksle matoma, kad termitinė jungtis yra vientisa ir sandūros srityje nėra jokių nevientisumų. Laidininko mikrostruktūra yra apsupta Cu lydinio (pažymėta „termitinė jungtis“ 3.4 a ir 3.4 b pav.), kuris kristalizavosi iš skystos būsenos įvykus egzoterminei termitinei reakcijai. Termitinės jungties skerspjūvyje (3.1 b ir 3.4 pav.) matoma, kad pats Cu-Nb laidininkas nebuvo išlydytas. Jo forma ir mikrostruktūra praktiškai liko nepažeistos. Tai reiškia, kad laidininkų sujungimas buvo atliktas labai dideliu suvirinimo greičiu. Jungties skerspjūvio mikroskopinės analizės metu Cu-Nb laidininko paviršiuje, nepastebėta plono vario apvalkalo. Tai leidžia manyti, kad jis buvo išsilydęs ir susimaišė su termitinės jungties metalu suvirinimo metu. Išsilydžiusios sritys sandūros srityje (sritis Nr. 1 pav. 3.4 b) įrodo, kad išsilydę buvo tik paviršiniai laidininko ir jo varinio apvalkalo sluoksniai. Remiantis srities Nr. 1 EDS rezultatais, tai yra Nb fazė, kuri galėjo susiformuoti dėl atskirų Nb gijų išlydymo paviršiniame laidininko sluoksnyje. Tai reiškia, kad termitinės reakcijos temperatūra viršijo Nb lydymosi temperatūrą (2469 °C). Be Nb, šiose išlydytose srityse taip pat buvo ~14 % Cu, ~5 % Fe ir ~3,2 % kitų elementų. Kadangi Cu ir Nb tirpumas kietoje būsenoje yra labai mažas, šie išlydyti regionai daugiausia susideda iš dviejų fazių – Cu ir Nb.

Atžvelgiant į gautus EDS spektrinės analizės rezultatus (3.1 lentelė) termitinės jungties sudėtyje (sritis Nr. 3) yra ~98 % Cu ir nereikšmingas (~2 %) kitų elementų kiekis.

Sn siūlėje buvo tik apie 0,21 % (3.1 lentelė). Šis elementas yra labai tirpus skystame Cu. Remiantis Cu-Sn fazinių virsmų diagrama (Franke *et al.* 2005), Cu-Sn lydiniai, kuriuose Sn kiekis yra mažesnis kaip 5 %, yra vienfaziai (α – kietieji tirpalai). Šiuo atveju Cu matricoje nebuvo susiformavusios trapios antrinės fazės, kadangi Sn kiekis termitinėje jungtyje neviršijo 5 % (Maltsev 1970).



3.4 pav. Termitinės jungties skerspjūvis: a) mikrostruktūra šalia sandūros linijos; b) padidintas mikrostruktūros vaizdas su pažymėtomis EDS analizėssritimis (SEM nuotrauka)

Fig. 3.4. Cross-section of the thermite joint: a) microstructure near the conductor and fusion line; b) magnified microstructure with marked EDS areas (SEM image)

3.1 lentelė. Termitinės jungties mikrostruktūroje (3.4 b pav.) pažymėtų sričių, cheminė sudėtis (%) (nustatyta su EDS spektrometru)

Table 3.1. Chemical composition (%) of areas marked in thermite joint microstructure (Fig. 3.4 b) (determined with EDS spectrometer)

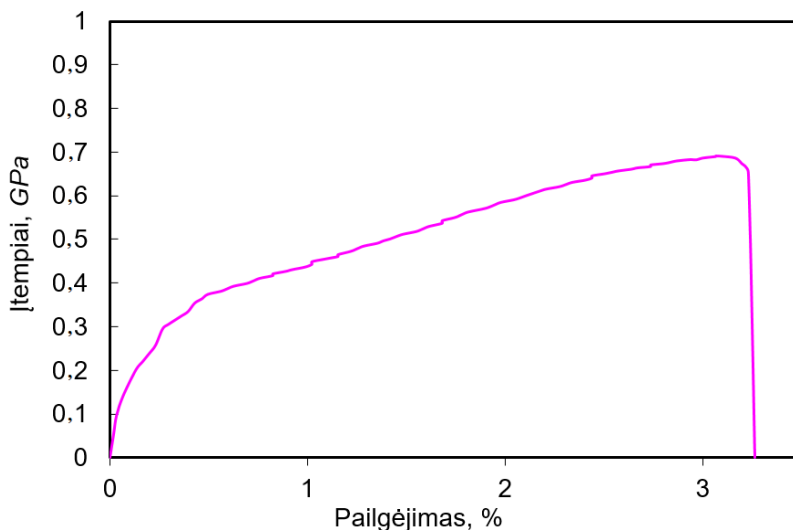
Sritis	Cheminis elementas, %				
	Fe	Cu	Nb	Sn	Other
1	5,08	14,19	76,87	0,03	3,83
2	72,28	23,40	0,19	0,00	4,13
3	0,65	98,08	0,00	0,21	1,06

Fe intarpai suvirinimo srityje atsirado dėl plono Fe-Sn diskinio įdėklo naudojimo ir jo susilydymo su skystais termitinės reakcijos produktais. Vidutinis Fe kiekis jungtyje siekia apie 0,65 % bendros termitinės jungties masės

(3.1 lentelė), tačiau Fe tirpumas Cu matricoje kambario temperatūroje ribojamas iki 0,25 % (Franke *et al.* 2005). Todėl šiuo atveju Cu matricoje išsiskiria dispersinė Fe fazė (sritis Nr. 2 3.4 b pav.). Tai yra tipinė Cu-Sn-Fe-Nb sistemos lydinų struktūra, atitinkanti Cu-Nb, Cu-Sn ir Cu-Fe fazių diagramas (Franke *et al.* 2005). Todėl šiuo atveju termitinės jungties struktūra sudaryta iš kietojo Cu tirpalo ir dispersinės Fe fazės.

Nors suvirinimo jungties metale yra daugiau kaip 98 % Cu, dėl Fe, Sn ir kitų elementų gali sumažėti jungties elektrinis laidumas lyginant su Cu-Nb laidininku. Taip pat šios priemaišos turi teigiamą poveikį ir užtikrina geresnį suvirintos jungties mechaninį stiprumą negu gryno vario. Gryno Cu stiprumas atkaitintoje būsenoje yra apie 220 MPa (Martienssen *et al.* 2006) ir kinta atsižvelgiant į grūdų dydį. Didžiausią vario lydinų stiprį galima pakankamai tiksliai numatyti pagal Vickerso kietumą, naudojant paprastą tiesinę priklausomybę $R_m = 3,353 \text{ HV}$ (Krishna *et al.* 2013). Išmatuotas termitinės suvirinimo jungties metalo kietumas nuo 91 iki 96 HV. Atsižvelgiant į metalo kietumą, apskaičiuotas suvirintos jungties stipris, kuris svyruoja nuo 305 iki 322 MPa, kas yra 39–46 % daugiau negu grynas varis.

Įtempių-pailgėjimo kreivė, gauta bandant bandinius su termitine jungtimi, pateikta 3.5 paveiksle. Maksimali apkrova, pasiekta atliekant termitinės jungties tempimo bandymą – 11 kN.



3.5 pav. Cu-Nb vielos su termitinio suvirinimo jungtimi įtempių-pailgėjimo kreivė (irimas – per perėjimo sritį tarp Cu-Nb laidininko ir jungties)

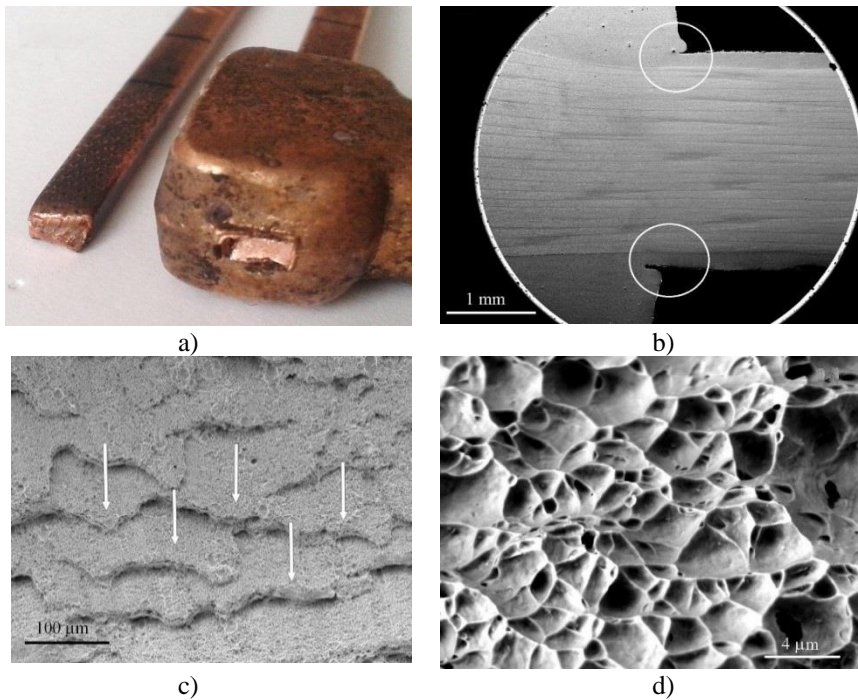
Fig. 3.5. Stress–elongation curve of Cu-Nb wire with thermite welding joint (break point – Cu-Nb conductor body near the weld)

Bandiniai su termitine jungtimi trūko per pagrindinį metalą šalia suvirinimo jungties (3.6 a pav.), kur susidarė įtempių koncentracija dėl staigos geometrinės formos pokyčio (3.6 b pav.). Lūžio paviršiaus orientavimas (45° apkrovos krypties atžvilgiu) įrodo, kad irimą lėmė šlyties įtempiai. SEM vaizduose su mažu didinimu matoma, kad gautas laiptuotas lūžio paviršius (3.6 c pav.) su skirtingo dydžio mikroduobutėmis (3.6 d pav.). Tokia paviršiaus topografija apibūdina plastišką trūkimą laidininko skerspjūvyje. Plastiškam lūžiui būdingos didelės plastinės deformacijos, todėl šiam lūžiui sukelti reikės proporcingai didelių energijos sąnaudų. Todėl, projektuojant metalines konstrukcijas, dažniausiai rekomenduojama, kad medžiaga suirtų plastiškai.

Didžiausi tempimo įtempiai, bandinyje su termitine jungtimi, siekė 701 MPa, o tai yra 62,5 % šio mikrokompozito laidininko stiprio tempiant. Bandinio santykinis pailgėjimas po lūžio siekė 3,2 % (arba 76,2 % mikrokompozitinio laidininko pailgėjimo). Tempimo bandymo metu bandiniai lūžo per Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko pagrindinį metalą šalia suvirinimo jungties (lūžio paviršiaus struktūra pateikta 3.6 pav.). Lūžis šioje srityje įrodo, kad įtempių koncentracija turi ypatingą įtaką jungties stipriui. Taip pat tai reiškia, kad suvirinimo siūlės skerspjūvis gali būti sumažintas neprarandant jungties stiprumo. Siekiant eksperimentiškai įvertinti termitinių mažesnio skersmens suvirinimo jungčių stiprumą buvo paruoštos dvi papildomos suvirintų bandinių serijos su 35 mm^2 ir 70 mm^2 jungties skerspjūviais. Atlikus papildomus tempimo bandymus nustatyta, kad pasiektos maksimalios apkrovos, įtempių-deformacijų kreivės ir lūžio pobūdis toje pačioje vietoje yra identiški su pirmo eksperimento rezultatais (kai jungties skerspjūvis siekė 100 mm^2). Remiantis šiais rezultatais 35 mm^2 skerspjūvio pakanka, kad būtų išvengta jungties irimo per suvirinimo jungtį. Tačiau norint užtikrinti jungčių patikimumą, paprastai įvedamas atsargos koeficientas, kuris suvirintoms jungtims paprastai yra nuo 1,4 iki 1,6 karto (Nedoseka 2012). Atitinkamai, optimalus termitinės suvirinimo jungties skerspjūvis gali būti $\sim 50 \text{ mm}^2$.

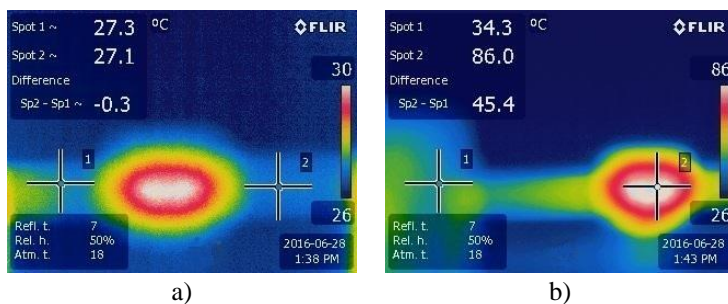
Jungties elektrinės varžos matavimai parodė, kad 30 cm ilgio laidininko su termitine jungtimi elektrinė varža neženkiai padidėjo, lyginant su tokio pat ilgio laidininko varža kambario temperatūroje ($0,01 \Omega$). Išmatuota laidininko su termitine jungtimi elektrinė varža siekė $0,011 \Omega$. Toks elektrinės varžos skirtumas neviršija 1,2 karto, kuris rekomenduojamas termitinėms jungtims (Chomikov *et al.* 1963).

Bandinių su termitinio suvirinimo jungtimi kaitinimo tekant elektros srovei rezultatai parodė, kad termovizoriumi užfiksuotas temperatūros pasiskirstymas šio eksperimento pradžioje ir po 2 minučių kaitinimo atitinka keliamus reikalavimus elektrokontaktinėms jungtims (3.7 a ir 3.7 b pav.). 45°C siekiantis temperatūrų skirtumas jungtyje ir laidininke tekant elektros srovei neviršijo leistino temperatūrų skirtumo (95°C) (GOST 17441; GOST 10434).



3.6 pav. Trūkio vieta ir lūžio paviršiaus tekstūra: a) jungties trūkio vieta; b) įtempių koncentracijos vieta jungties skerspjūvyje; c) laiptuotos formos lūžio paviršius; d) skirtingo dydžio duobelių vaizdas lūžio paviršiuje

Fig. 3.6. Location of rupture and texture of fracture surface: a) location of joint rupture; b) locations of stress concentration in the cross-section of joint; c) view of stair-shaped surface of fracture; d) view of different sizes dimples on the fracture surface



3.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas termitinio suvirinimo jungtyje: a) prieš kaitinimą; b) po 2 min. kaitinimo; 1 ir 2 yra matavimo taškai

Fig. 3.7. View of the temperature distribution in the thermite welded joint: a) before heating; b) after 2 min of heating; 1 and 2 are the points where measurements were made

3.2. Lazerinio suvirinimo technologinių parametrų įtakos virintinių jungčių struktūrai ir savybėms tyrimo rezultatai

Atsižvelgiant į Cu fizines savybes ir tipinę daugumos YAG lazerių impulsų trukmę (1–20 ms), o taip pat į sąlygą, kad Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų lazerinis suvirinimas turi būti atliekamas taikant ne mažesnę nei $3 \cdot 10^6$ W/cm² ir ne didesnę nei $5,9 \cdot 10^6$ W/cm² galios tankį, o impulso energija turi būti ne mažesnė kaip 40 J, tinkamą režimą galima pasirinkti tarp keturių geriausių skaičiavimų variantų (3.2 lentelė).

3.2 lentelė. Kritinės galios tankio diapazonas P_d , W/cm²

Table 3.2. Critical power density range P_d , W/cm²

Impulso trukmė, s (ms)	Kritinis galios tankis P_d , W/cm ²
0,001 (1)	$22,4 \cdot 10^6$
0,002 (2)	$11,2 \cdot 10^6$
0,003 (3)	$7,47 \cdot 10^6$
0,004 (4)	$5,61 \cdot 10^6$
0,005 (5)	$4,48 \cdot 10^6$
0,006 (6)	$3,73 \cdot 10^6$
0,007 (7)	$3,20 \cdot 10^6$
0,008 (8)	$2,80 \cdot 10^6$
0,009 (9)	$2,49 \cdot 10^6$
0,01 (10)	$2,24 \cdot 10^6$

Tokius reikalavimus geriausiai atitinka suvirinimo režimai, kuriuose taikoma impulso trukmė yra 5–7 ms (0,005–0,007 s). Tokiais atvejais galios tankis yra nuo $3,8 \cdot 10^6$ W/m² iki $4,48 \cdot 10^6$ W/m² (3.2 lentelė). Netinkami režimai bus su labai trumpa impulsų trukme 1–4 ms (0,001–0,004 s), o taip pat didesne nei 7 ms (0,007 s). Pirmuoju atveju dideli galios tankiai sąlygoja metalo garavimą ir ištaškymą, o antruoju atveju galios tankis bus nepakankamas metalui lydyti.

Minimalus lazerio dėmės skersmuo metalo paviršiuje daugumos pramoninių YAG lazerių atveju būna apie 0,01 cm. Vario lydinius įmanoma išlydyti tik su mažesniu, nei 0,06 cm skersmens spinduliu.

Spinduliuotės galia P_p , priklausomai nuo impulso trukmės ir lazerio dėmės skersmens buvo apskaičiuojama pagal 2.3 formulę. Reikalinga suvirinimui lazerio spinduliuotės galia P_p , priklausomai nuo naudojamos lazerio dėmės skersmens (kuri gali svyruoti 0,01–0,06 cm diapazone) ir impulsų trukmės (kuri gali svyruoti 1–7 ms diapazone) svyruoja labai plačiame diapazone nuo 251 iki 86016 W

(86 kW). Jei taikomas koncentruotas lazerio spindulys (0,05–0,06 cm skersmens) ir pakankamai ilgos trukmės impulsai (4–7 ms) lazerio spinduliuotės galia P_p svyruoja nuo 6272 W (6,3 kW) iki 15820 W (15,8 kW). Su 400 W YAG impulsinio lazerinio suvirinimo įrenginiu galima pasiekti 14 kW spinduliuotės galios P_p . Suvirinimo režimai, kuriems reikalinga didesnė nei 14 kW galia, su šia suvirinimo įranga neįmanomi.

Trys lazerinio suvirinimo parametrai labiausiai veikia metalo įvirinimo gylį. Norint pasiekti maksimalų įvirinimą, lazerio spindulys turi būti sufokusuotas į paviršių ($F=0$), o suvirinimo greitis turi būti minimalus. Nuo suvirinimo greičio ir spindulio fokusavimo labai priklauso suvirintos zonos gylis ir terminio poveikio zonos plotis. Didinant suvirinimo greitį susiaurėja suvirinimo ir terminio poveikio zonos plotis. Taikant platų nefokusuotą lazerio spindulį ir didesnės galios lazerį suvirinimo plotis didėja. Kuomet lazerio spindulys sufokusuojamas į gilesnius metalo sluoksnius ($F<0$), maksimalus įvirinimo gylis ženkliai sumažėja ir terminio poveikio zonos plotis šiek tiek susiaurėja, tačiau suvirinimo plotis būna didesnis (Benyounis *et al.* 2005). Įvirinimo gylis taikant suvirinimo režimus Nr. 4–6 (3.3 lentelė) gali siekti 0,7–0,85 mm. Todėl 0,8 mm storio Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko sujungimui gali būti naudojamas vienpusis ir abiejų pusių suvirinimas. Praktiškai labiau pageidaujamos jungtys – suvirintos iš abiejų pusių.

Atsižvelgiant į tai suvirinimo eksperimentams racionaliausias suvirinimo režimas buvo pasirinktas šis: vieno impulso energija 63 J, spinduliuotės galia 13 kW, impulsų trukmė 5 ms, impulsų dažnis 6 Hz, lazerio dėmės skersmuo 0,06 cm, suvirinimo greitis 0,7 mm/s.

Atsižvelgiant į naudojamose eksperimentuose lazerinio suvirinimo įrangos charakteristikas, suvirinimo režimai 4–6 (3.3 lentelė) šiuo atveju gali būti racionaliausieji.

Lazerinio suvirinimo jungčių su pridėtinio metalu bendras vaizdas pateiktas 3.8 ir 3.9 paveikslė. Gautų jungčių kokybė buvo vertinama atliekant rentgenografinius tyrimus. Pateiktose rentgeno nuotraukose (3.10 pav.) ir virintinių jungčių skerspjūvyje (3.11 ir 3.12 pav.) matyti, kad suvirinant lazeriu su pridėtine medžiaga ir be jos gaunamos kokybiškos virintinės jungtys be nepriimtinių vidinių defektų (įtrūkimų, nesulydymo, neįvirinimo, poringumo, intarpų ir kitų pavojingų nevientisumų). Abiem suvirinimo atvejais Cu-Nb laidininko briaunos buvo aplydytos, tačiau tai buvo labai plonas sluoksnis reikalingas tarpelio tarp briaunų užpildymui skystu metalu.

Pagrindiniai parametrai, apibrėžiantys lazerinio suvirinimo jungties skerspjūvio matmenis, yra įvirinimo gylis ir plotis. Šiuo atveju maksimalus įvirinimo gylis ir plotis yra lygus laidininko storiui. Suvirinimo jungties plotis po suvirinimo be pridėtinio metalo yra ~3,0 mm, o su pridėtinio metalu – ~1,8 mm. Paskutiniu atveju suvirintų

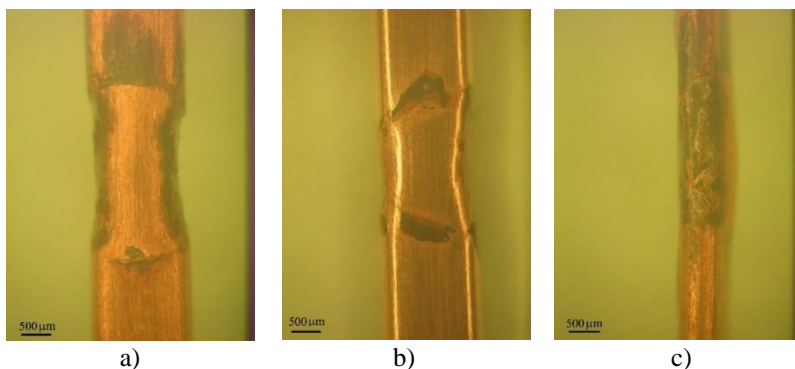
jungčių plotis yra siauresnis ir skerspjūvio plotas mažesnis, nes tomis pačiomis suvirinimo sąlygomis dalis energijos sunaudojama pridėtinio metalo lydymui.

3.3 lentelė. Optimalių suvirinimo parametrų diapazonas

Table 3.3. Range of optimum welding parameters

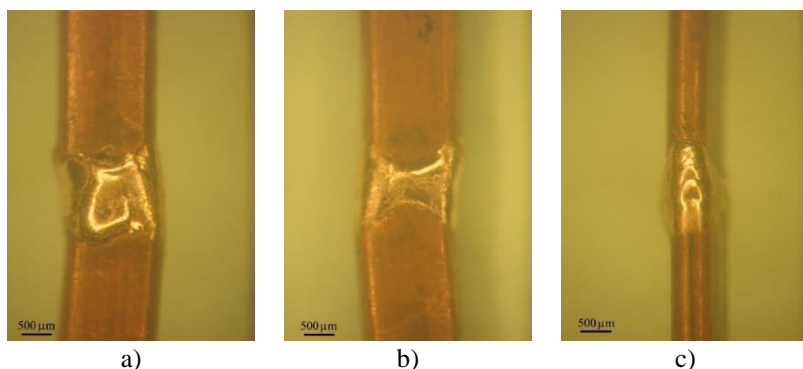
Režimo Nr.	E_p , J	f , Hz	P_p , W	D , cm	t_p , s	P_d , W/cm ²	v , mm/s (mm/min)
1	11	36	10 976	0,025	0,001	$22,4 \cdot 10^6$	1,8 (108)
2	28	14	14 000	0,04	0,002	$11,2 \cdot 10^6$	1,12 (67)
3	35,6	11,2	11 877	0,045	0,003	$7,47 \cdot 10^6$	1,0 (60)
4	53,2	7,5	13 295	0,055	0,004	$5,61 \cdot 10^6$	0,825 (50)
5	63,1	6,3	12 633	0,06	0,005	$4,48 \cdot 10^6$	0,75 (45)
6	74,1	5,4	12 346	0,065	0,006	$3,73 \cdot 10^6$	0,7 (42)
7	90,9	4,4	12 987	0,07	0,007	$3,37 \cdot 10^6$	0,62 (37)
8	112,5	3,6	13 888	0,08	0,008	$2,76 \cdot 10^6$	0,58 (35)

Suvirinimo jungtys, turinčios formos koeficientą $\phi = h/w \leq 0,5-0,7$, yra daugiausiai rekomenduojamos stiprumo atžvilgiu (Murzin *et al.* 2006). Cu-Nb laidininkų virintinių jungčių formos koeficientas šiuo atveju yra 0,26–0,44 ir atitinka šiuos reikalavimus.



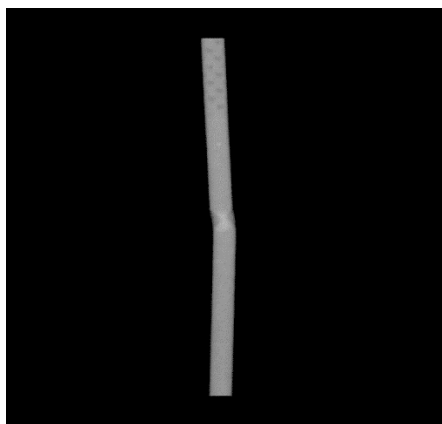
3.8 pav. Bendras Cu-Nb laidininko sandūrinės jungties vaizdas po lazerinio suvirinimo ir mechaninio valymo (be pridėtinio metalo): a) jungties vaizdas iš viršaus; b) jungties vaizdas iš apačios; c) jungties vaizdas iš priekio

Fig. 3.8. General view of the Cu-Nb wire joint after laser welding and mechanical cleaning (autogenous welding): a) top view of the joint; b) bottom view of the joint; c) front view of the joint



3.9 pav. Bendras Cu-Nb laidininko sandūrinės jungties vaizdas po lazerinio suvirinimo ir mechaninio valymo (suvirinimas su pridėtine medžiaga): a) jungties vaizdas iš viršaus; b) jungties vaizdas iš apačios; c) jungties vaizdas iš priekio.

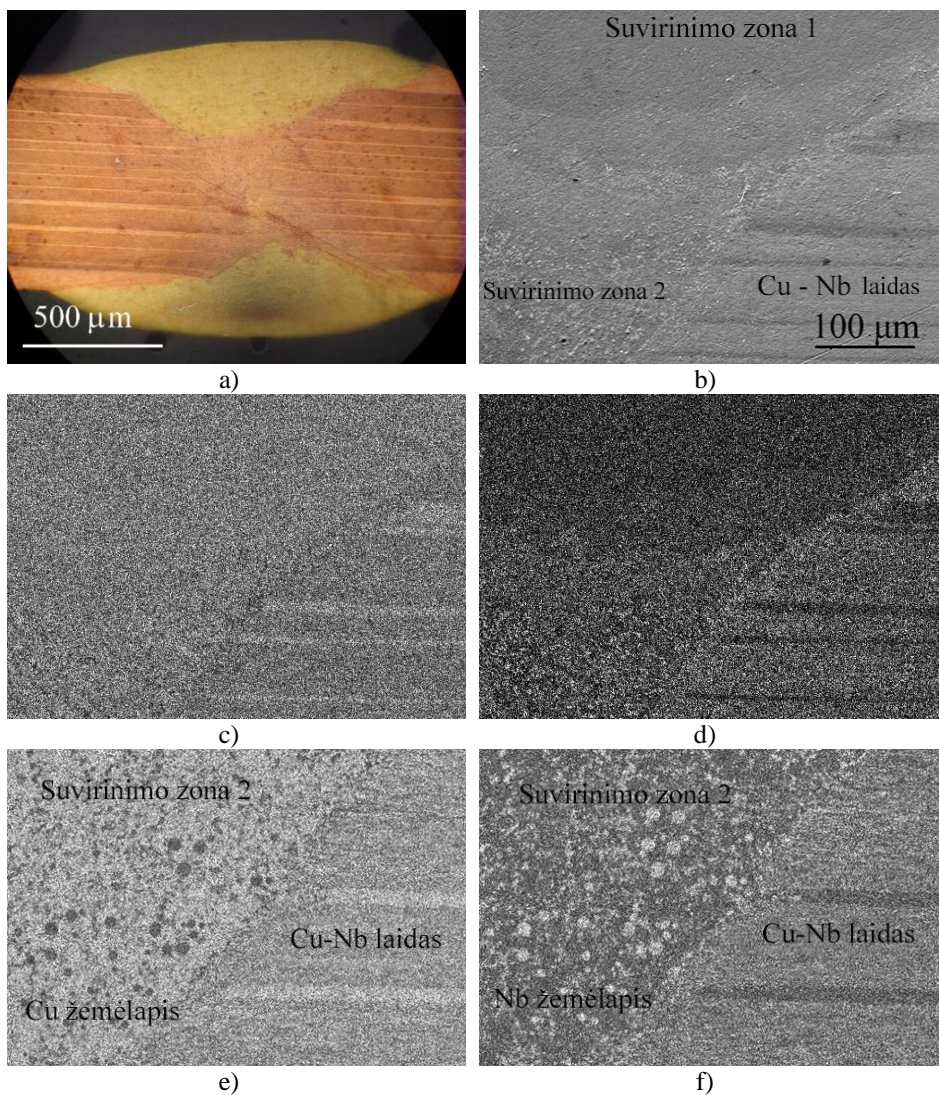
Fig. 3.9. General view of the Cu-Nb wire joint after laser welding and mechanical cleaning (with filler metal): a) top view of the joint; b) bottom view of the joint; c) front view of the joint



3.10 pav. Lazerinio suvirinimo jungties radiografinė nuotrauka

Fig. 3.10 Radiographic film of laser welded joint

Suvinant su pridėtiniu metalu siūlėje nustatytos dvi skirtingos sudėties ir mikrostruktūros sritys (3.11 b–3.11 d pav.). Vidurinė suvirinimo siūlės dalis (sritis Nr. 2) susideda iš vario (~84 masės %) ir niobio (~16 masės %), t.y. atitinka Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko cheminę sudėtį (žr. 3.4 lentelę).



3.11 pav. Struktūra jungties suvirintos su pridėtiniu metalu: a) išilginis jungties pjūvis; b) padidintas mikrostruktūros SEM vaizdas ties sulydymo liniją; c) Cu pasiskirstymas suvirinimo srityje Nr. 1; d) Nb pasiskirstymas suvirinimo srityje Nr. 1; e) Cu pasiskirstymas suvirinimo srityje Nr. 2; f) Nb pasiskirstymas suvirinimo srityje Nr. 2

Fig. 3.11. The structure of the joint welded with filler metal: a) longitudinal section of the joint; b) magnified SEM image of the microstructure near the interface between wire and weld; c) distribution of Cu element in welding area no. 1; d) distribution of element Nb in welding area no. 1; e) distribution of Cu element in welding area no. 2; f) distribution of Nb element in welding area no. 2

3.4 lentelė. Sričių Nr. 1 ir 2 (3.11 b pav.) cheminė sudėtis (pagal EDS) (masės %)

Table 3.4. Regions No. 1 and 2 (Fig. 3.11. b) chemical compositions (by EDS) (wt.%)

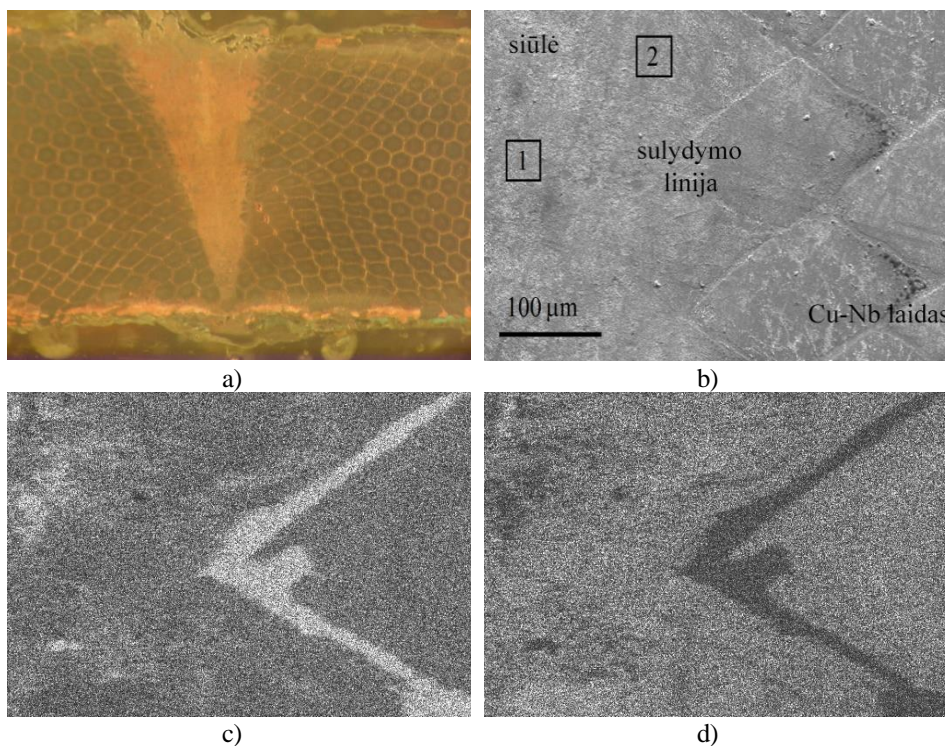
Sritis	Cheminis elementas, %			
	Cu	Nb	Sn	Kiti
1	96,94	0,96	0,61	1,49
2	83,66	14,23	–	2,11

Ši suvirinimo jungties sritis susiformavo dėl Cu-Nb laidininko lydymo. Cu ir Nb elementų pasiskirstymas (3.11 e, 3.11 f pav.) parodė, kad suvirinimo srities Nr. 2 mikrostruktūra sudaryta iš Cu matricos ir dispersiškos Nb fazės (globulių). Kadangi Cu ir Nb yra beveik netirpūs kietoje būsenoje, šiuo atveju suformuojamas Cu ir Nb mechaninis mišinys. Tokia struktūra būdinga Cu-Nb lydinų mikrostruktūrai. Niobio globulių dydis yra labai mažas (lyginant su Cu-Nb mikrostruktūra po įprastinio liejimo) – nuo dešimtosios arba šimtosios mikrometro dalies iki kelių mikrometrų. Tai gali didinti suvirinimo siūlės stiprumą. Išorinės suvirinimo jungties dalies (sritis Nr. 1, 3.11 b pav.) sudėtyje yra ~97 masės % vario, kitų elementų kiekis neviršija 3 % (3.4 lentelė). Tai byloja, kad ši siūlės sritis formavosi dėl pridėtinės medžiagos lydymosi.

Suvirinimo be pridėtinio metalo atveju (3.12 a–3.12 d pav.) suvirinimo jungtyje gaunama vienodesnė mikrostruktūra ir cheminė sudėtis visame skerspjuvyje. Suvirinimo siūlės elementinė sudėtis nežymiai skiriasi nuo pradinio Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko sudėties (3.5 lentelė). Jungties mikrostruktūra susideda iš dviejų fazių: Cu matricos ir dispersinės Nb fazės. Lazerinio suvirinimo metu vykstantis suvirinimo vonelėje intensyvus maišymasis lemia vienodą Nb dalelių pasiskirstymą Cu matricoje (3.12 c ir 3.12 d pav.).

Lazerinių jungčių elektrinės varžos matavimais nustatyta, kad 30 cm ilgio laidininko su lazerinio suvirinimo jungtimi elektrinė varža yra didesnė, lyginant su tokio pat ilgio laidininko varža (0,01 Ω). Tačiau elektrinės varžos skirtumas nėra reikšmingas (iki 1,1 karto) ir tai neviršija rekomenduojamos normos. Didžiausias elektrinės varžos skirtumas tarp laidininko ir bandinių su suvirinta jungtimi negali viršyti 1,5 karto (GOST 10434).

Bandinių su lazerinio suvirinimo jungtimi kaitinimo tekant elektros srovei rezultatais nustatyta, kad termovizoriumi užfiksuotas temperatūros pasiskirstymas šio eksperimento pradžioje ir po 2 minučių kaitinimo atitinka keliamus reikalavimus elektrokontaktinėms jungtims (3.13 pav.). 45 °C siekiantis temperatūrų skirtumas jungtyje ir laidininke tekant elektros srovei neviršija nustatytų normų.



3.12 pav. Struktūra jungties, suvirintos be pridėtinės medžiagos: a) lazerio įvirinimo gylis vienos pusės suvirinimo atveju; b) padidinta mikrostruktūros SEM nuotrauka šalia ties sulydymo linija; 1 ir 2 – pažymėtos EDS sritys; c) Cu pasiskirstymas ties sulydymo linija; d) Nb pasiskirstymas ties sulydymo linija

Fig. 3.12. The structure of the joint welded without filling material (autogenous welding):

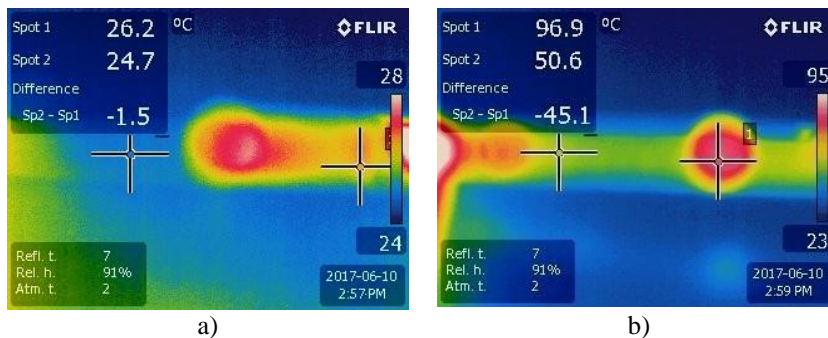
a) laser penetration depth after welding on one side; b) magnified SEM image of the microstructure near the interface between wire and weld;

1 and 2 – marked EDS areas; c) distribution of Cu element in weld area and fusion line; d) distribution of Nb element in weld area and fusion line

3.5 lentelė. Sričių Nr. 1 ir 2 (3.12 b pav.) cheminė sudėtis (pagal EDS) (masės %)

Table 3.5. Regions No. 1 and 2 (Fig. 3.12. b) chemical compositions (by EDS) (wt.%)

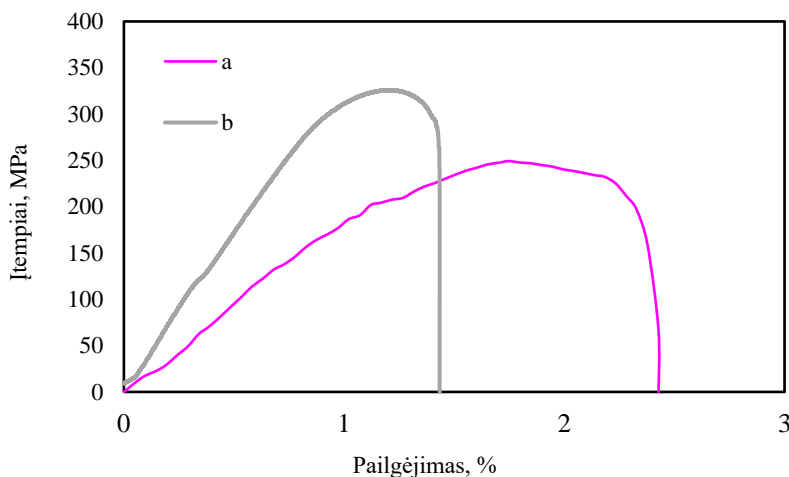
Sritis	Cheminis elementas, %		
	Cu	Nb	Other
1	86,71	10,79	2,50
2	79,03	18,41	2,56



3.13 pav. Temperatūros pasiskirstymas lazerinio suvirinimo bandinyje: a) prieš kaitinimą; b) po 2 min tekančią 200 A srovę; 1 – matavimo taškas jungties srityje

Fig. 3.13. Temperature distribution in laser welded sample: a) before heating; b) after 2 min 200 A current flow; 1 – measurement point in connector area

Bandinių su suvirintomis jungtimis tempimo bandymais nustatyta, kad visos lazeriu virintos jungtys lūžta per sulydymo liniją. Suvirinta su pridėtinio metalu jungtis atlaikė apie 340 N tempimo apkrovą (3.14 pav.). Atitinkamai, įtempiai virintinės jungties srityje pasiekė 250 MPa, o tai sudaro apie 22,3 % nuo Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko stiprumo ribos (3.14 pav.).



3.14 pav. Lazerinio suvirinimo bandinių įtempių ir pailgėjimo kreivės: a) bandinys suvirintas su pridėtinio metalu; b) bandinys suvirintas be pridėtinio metalo (lūžio vieta – sulydymo sritis)

Fig. 3.14. Stress-elongation curves of laser welded joints; a) sample welded with filler metal; b) welded sample without filler metal (break point – fusion line)

Bandinio su šia jungtimi santykinis pailgėjimas suirimo metu buvo apie 2,5 %. Tai yra apie 59,5 % nuo mikrokompozitinio laidininko pasiekiamo santykinio pailgėjimo vertės. Suvirinta be pridėtinio metalo jungtis atlaikė apie 456 N tempimo apkrovą (3.14 pav.). Įtempiai irimo metu pasiekė 335 MPa, tai yra 30 % nuo Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko stiprumo ribos (3.14 pav.). Bandinio su tokia jungtimis santykinis pailgėjimas suirimo metu siekė tik 1,5 %. Tai sudaro apie 35,7 % nuo mikrokompozitinio laidininko santykinio pailgėjimo vertės.

Pagal Kurnakovo taisyklę (Kurnakov 1960, Kurnakov 1961), minimali Cu-18Nb (masės %) lydinio stiprumo riba gali būti apie 237 MPa. Pasiekta suvirintos su pridėtine medžiaga jungties stiprumo riba yra šiek tiek didesnė už šią minimalią vertę, o skirtumas tarp eksperimentiniu būdu nustatytos ir apskaičiuotos stiprumo ribos yra 5 %. Nustatyta suvirinto be pridėtinės medžiagos bandinio stiprumo riba yra maždaug 1,4 karto didesnė už gaunamą tradiciniu būdu liejant Cu-18Nb (masės %) lydinį arba apskaičiuotą pagal Kurnakovo taisyklę stiprumo reikšmę analogiškai binarinei metalo sistemai. Tačiau autogeninio lazerinio suvirinimo jungtys pasižymi mažesniu plastiškumu nei mikrokompozitinio laidininko ir lazeriu suvirinta su pridėtine medžiaga jungtis.

3.3. Elektronpluoščio suvirinimo technologinių parametrų įtakos virintinių jungčių struktūrai ir savybėms tyrimo rezultatai

Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų elektronpluoštis suvirinimas atliktas su skirtingo elektronų pluošto dėmės skersmeniu ir galios tankiu. Kuomet buvo taikomas didelis elektronų pluošto galios tankis, buvo pastebėtas suvirinimo vonelės išgarinimas, o tai reiškia, kad vietoj lydymo ir suvirinimo Cu-Nb mikrokompozitinis laidininkas buvo pjaunamas.

Tinkamos suvirinimo siūlės gaunamos kai dėmės skersmuo buvo 4–5 mm (tuomet galios tankis svyravo nuo $4,8 \cdot 10^3$ – $7,6 \cdot 10^3$ W/cm²) 3.8 lentelė. Elektronų pluošto dėmės skersmuo buvo nustatomas pagal nomogramą ir eksperimentiniu būdu patikrinama ar parinktas elektronų pluošto skersmuo yra tinkamas vario-niobio mikrokompozitinio laidininko suvirinimui.

Kai elektronų pluošto galios tankis yra mažas (iki 10^5 W/cm²), medžiaga kaitinama dėl laidumo, o lydymo zona turi pusapvalę formą. Varinių lydinių, kai reikia giliai įvirinti, elektronų pluošto galia turi būti didesnė nei 4,2 kW, o kritinis elektronų pluošto galios tankis turiviršyti $4,45 \cdot 10^6$ W/cm².

Eksperimentuose buvo naudojamas suvirinimo režimas su nefokusuotu spinduliu, kuris paprastai taikomas ploniems gaminiams. Tokiu atveju suvirinimo jungties plotis pagal 2.19 lygtį turi viršyti 5,2 mm. Jungties plotis taikant

nurodytus parametrus siekė 14–15 mm (3.15 pav.). Tikrasis jungties plotis koreliuoja su reikšmėmis pagal 2.19 lygtį (3.6, 3.7 lentelės).

3.6 lentelė. Elektronpluoščio suvirinimo galios ir energijos tankis, įvirinimo gylio ir jungties pločio priklausomybė nuo elektronų pluošto dėmės skersmens

Table 3.6. Electron beam welding power and energy density, penetration depth and width of joint dependence on the beam spot size

Elektronų pluošto dėmės skersmuo φ , mm	0,5	1	2	3	4	5
Galios tankis G , W/cm ²	$4,8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^4$	$1,35 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^3$
Energijos tankis E , J/mm ²	457,14	228,57	114,28	176,19	57,14	45,7
Įvirinimo gylis H , mm	N	N	D	D	2,4	2,4
Jungties plotis B , mm	N	N	D	D	14	15

Pastaba: N – nėra sulydymo; D – suvirinimo defektai.

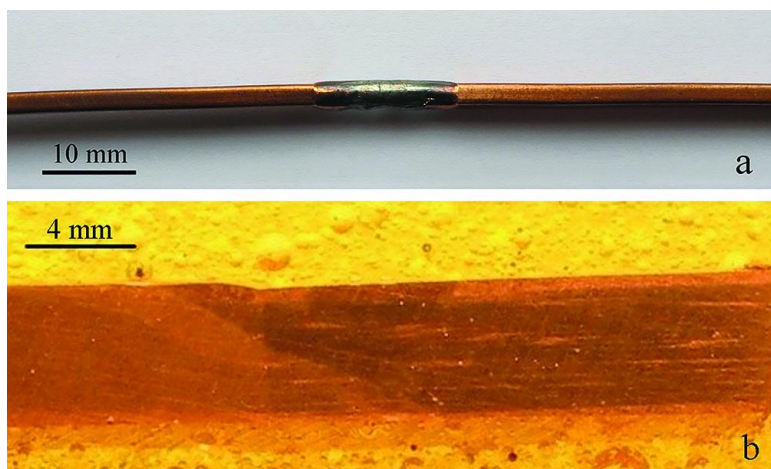
3.7 lentelė. Apskaičiuotos įvedamos šilumos, įvirinimo gylio ir jungties pločio reikšmės pagal lygtis (2.15, 2.17–2.19)

Table 3.7. Calculated heat input, penetration depth and width of joint according to Equations (2.15, 2.17–2.19)

Apskaičiuotas įvirinimo gylis H , mm (2.17 lygtis)	Apskaičiuotas įvirinimo gylis H , mm (2.18 lygtis)	Apskaičiuotas jungties plotis B , mm (2.19 lygtis)	Įvedama šiluma Q , kJ/cm (2.15 lygtis)
7,92	3,00	14,75	4

Suvirinimo parametrų optimizavimas šiuo atveju yra pernelyg kompliktuotas, nes suvirinimo eksperimentams pritaikyta elektronpluoščio suvirinimo įranga neturi lanksčios suvirinimo parametrų kitimo sistemos ir negali atlikti suvirinimo impulsiniu režimu (veikia tik nepertraukiamai), o taip pat neturi tikslios spindulių fokusavimo ir stebėjimo sistemos.

Radiografinės ir išilginio pjūvio mikroskopinio tyrimo (3.15 pav.) rezultatais nustatyta, kad gautos suvirintos jungtys neturi neleistinų suvirinimo defektų.



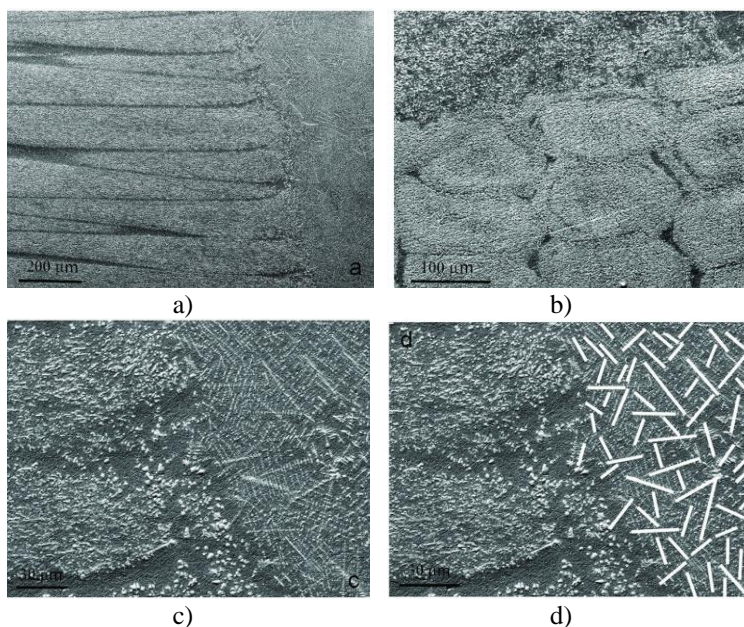
3.15 pav. Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko elektronpluoščio suvirinimo jungties pavyzdys: a) vaizdas iš priekio; b) išilginis skerspjūvis jungties srityje (suvirinimas atliktas elektronų pluoštu, kurio skersmuo ~5 mm)

Fig. 3.15. Sample of electron beam welding joint of copper-niobium microcomposite wire: a) front view; b) longitudinal section of joint area (welding was done with spot diameter of ~5 mm)

Iš Cu-Nb dvikomponentės sistemos virsmų diagramos matoma, kad varis ir niobis turi labai ribotą tirpumą tarpusavyje. Niobis gali tirpti iki 1 % skystame varyje, esant 1090 °C temperatūrai. Varis daugiausiai ištirpsta apie 1,5 % niobyje, esant 1093 °C temperatūrai (Pilarczyk *et al.* 2014, Sinko 1992). Didelis skirtumas tarp šių elementų lydymosi temperatūros ($T_{\text{Cu}} = 1083$ °C, $T_{\text{Nb}} = 2465$ °C) yra pagrindinė priežastis, dėl kurios Cu-Nb liejiniuose ar suvirinimo jungtyse gaunama dendritinė granuluota struktūra. Granulių morfologiją iš esmės lemia lydymo sąlygos suvirinant (Raabe *et al.* 1995).

Elektronpluoščio suvirinimo be pridėtinės medžiagos jungties struktūrą sudaro vario matrica ir niobio dendritai 3.16 pav.

Tokia mikrostruktūra yra analogiška Cu-Nb lydinio (82 masės % Cu ir 18 masės % Nb), gaunamo lydymo krosnyje struktūrai. Tačiau mikrostruktūra, gauta elektronpluoščiu suvirinimu, yra pranašesnė, lyginant su kitais suvirinimo būdais, nes šiuo atveju suvirinama vakuume, dėl ko išvengiama daugumos suvirinimo defektų. Dispersinių niobio dalelių ir dendritų buvimas vario matricoje sąlygoja geresnį virintinės jungties stiprumą (Sinko 1992).



3.16 pav. Elektronpluoščio suvirinimo jungčių struktūros SEM nuotraukos:

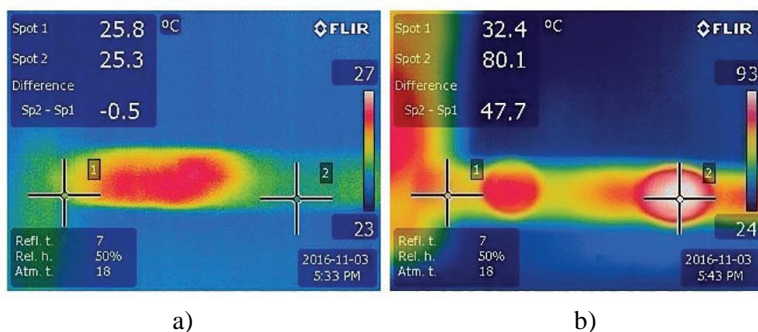
- a) išilginis jungties pjūvis; b) jungties skerspjūvis; c) sulydymo sritis;
d) niobio dendritų morfologija

Fig. 3.16. Secondary electron images of electron beam welding joints:

- a) longitudinal section of joint; b) cross section of joint; c) fusion area;
d) niobium dendrites morphology

Elektronpluoščio suvirinimo jungčių elektrinės varžos matavimais nustatyta, kad 300 mm ilgio laidininko su elektronpluoščio suvirinimo jungtimi elektrinė varža yra didesnė, lyginant su tokio pat ilgio laidininko varža. Bandinio su suvirinta jungtimi išmatuota elektrinė varžos vertė buvo apie 0,011 Ω . Elektrinės varžos skirtumas 1,1 karto neviršija rekomenduojamos normos pagal GOST 10434 ir GOST 17441 reikalavimus. Didžiausias elektrinės varžos skirtumas tarp laidininko ir bandinių su suvirinta jungtimi negali viršyti 1,5 karto.

Bandinių su elektronpluoščio suvirinimo jungtimi kaitinimo tekant elektros srovei rezultatais nustatyta, kad termovizoriumi užfiksuotas temperatūros pasiskirstymas eksperimento pradžioje ir po 2 minučių kaitinimo atitinka keliamus reikalavimus elektrokontaktinėms jungtims (3.17 pav.). 48 °C siekiantis temperatūrų skirtumas jungtyje ir laidininke tekant elektros srovei neviršija leistino temperatūrų skirtumo (daugiausiai 95 °C) (GOST 17441; GOST 10434).



3.17 pav. Temperatūros pasiskirstymas elektronpluoščio suvirinimo jungtyje:

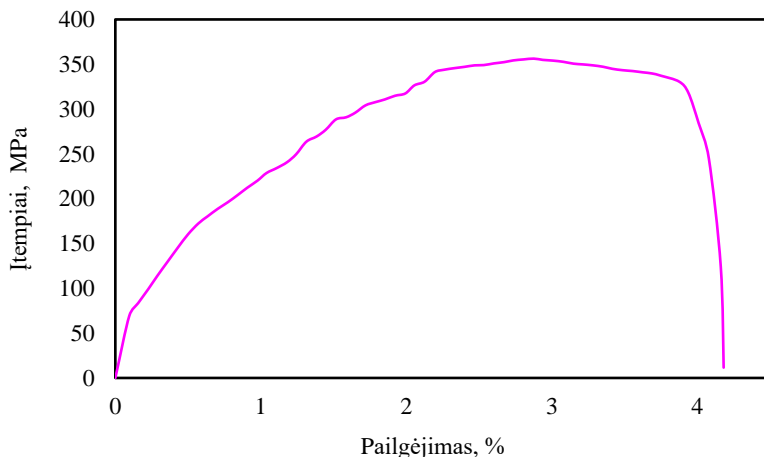
a) prieš kaitinimą; b) po 2 min. kaitinimo; 1 ir 2 – matavimo taškai

Fig. 3.17. View of the temperature distribution in the electron beam welded joint:

a) before the heating; b) after 2 min of heating;

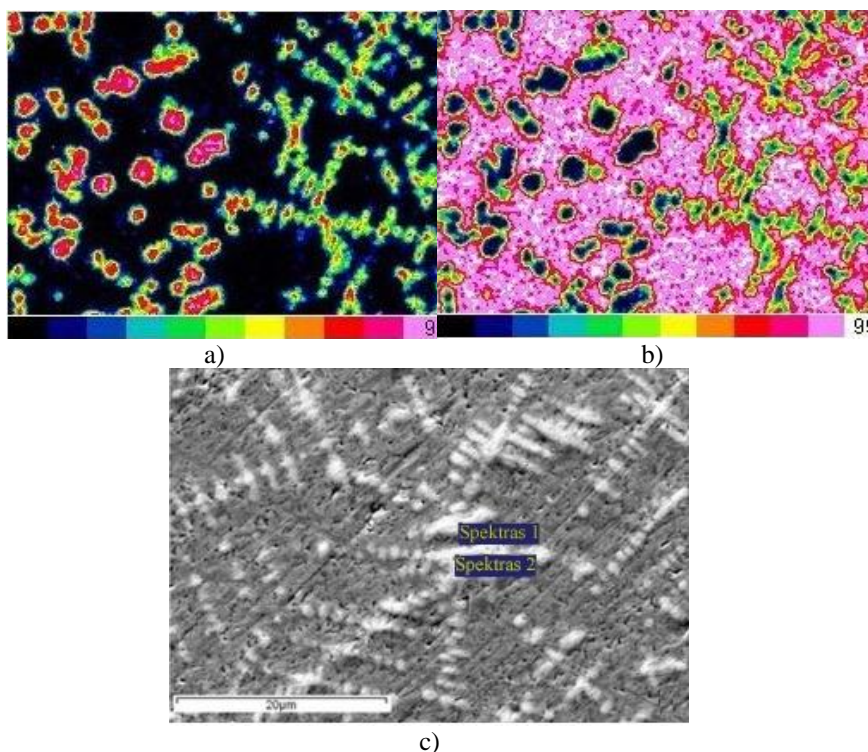
1 and 2 – points where the measurements were made

Atlikus jungties tempimo bandymus buvo nustatyta, kad elektronpluoščio suvirinimo jungties stiprumo riba siekia 356 MPa (31,8 % mikrokompozitinio laidininko stiprumo). Suvirinto bandinio santykinis pailgėjimas suirimo momentu buvo apie 4,2 % (102,4 % mikrokompozitinio laido pailgėjimo) (3.18 pav.) Tai faktiškai yra toks pat, kaip ir paties Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko santykinis pailgėjimas, kuris yra 3,3–4,1 % (Višniakov *et al.* 2006).



3.18 pav. Cu-Nb mikrokompozitinis laidininkas su elektronpluoščio suvirinimo jungtimi (trūkio taškas – suvirinimo siūlė šalia sulydymo linijos) įtempių-pailgėjimo kreivė

Fig. 3.18. Stress-elongation curve of Cu-Nb wire with electron beam welding joint (break point – welding seam near fusion area)



3.19 pav. Energijos dispersijos rentgeno spektroskopijos analizės rezultatai:

- a) kiekybinis niobio pasiskirstymas; b) kiekybinis vario pasiskirstymas;
- c) niobio dendritų analizės taškai

Fig. 3.19. Energy-dispersive X-ray analysis results:

- a) Quantitative X-ray map of niobium; b) quantitative X-ray map of copper;
- c) point analysis of niobium dendrites

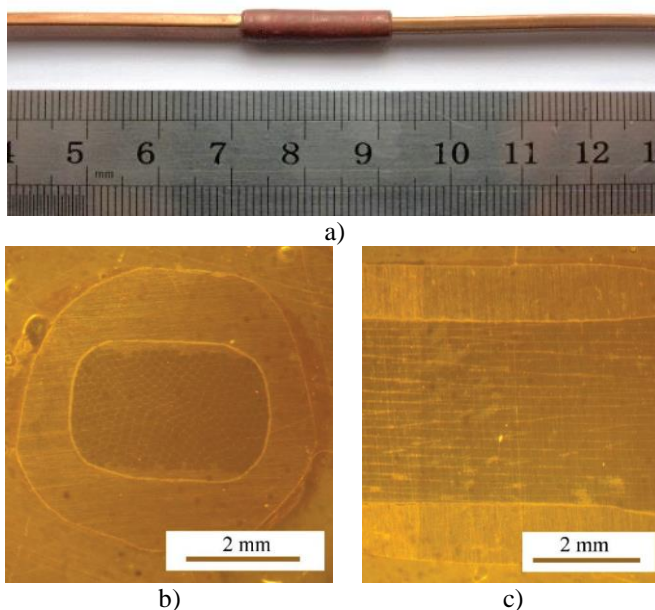
Dvifazių sistemų tokios savybės kaip kietumas ir stipris yra apskaičiuojamos pagal mišinių taisyklę. Grynojo, minkšto vario (po atkaitinimo) stiprumo riba yra 205 MPa (Isincev 2004, Martienssen *et al.* 2006, Kershenbaum 1993), o grynojo niobio – 330 MPa (Gempel 1965, Slavinskij 1952). Pagal mišinių taisyklę (Kurnakov 1960, Kurnakov 1961, Kurnakov 1963) minimali Cu-Nb (18 masės % Nb) stiprumo riba gali siekti apie 237 MPa. Tikrasis elektronpluoščio suvirinimo bandinio stiprumas tempiant yra didesnis už šią minimalią vertę, o skirtumas tarp išmatuoto ir apskaičiuoto elektronpluoščio suvirinimo jungties tempimo stiprumo siekia apie 50 %. Todėl galima konstatuoti, kad elektronpluoščio suvirinimo jungtys gaunamos stipresnės už Cu-Nb (18 masės % Nb) liejinio stiprumą. Iš mikrostruktūros tyrimų rezultatų galima teikti, kad geresnės jungties mechaninės

savybės pasiekiamos dėl suvirinimo metu gaunamos smulkiagrūdės mikrostruktūros. Vario lydinų takumo ir stiprumo ribos kinta proporcingai didėjant grūdų dydžiui. Suvirinimo siūlės zonoje susidarė smulkūs 7–50 μm Nb dendritai (3.16 pav). Šie dendritai yra tolygiai paskirstę vario matricoje ir orientuoti palei suvirinto laidininko ašį, t.y. suvirinimo vonelėje metalas kristalizavosi šilumos perdavimo ir nuvedimo kryptimi.

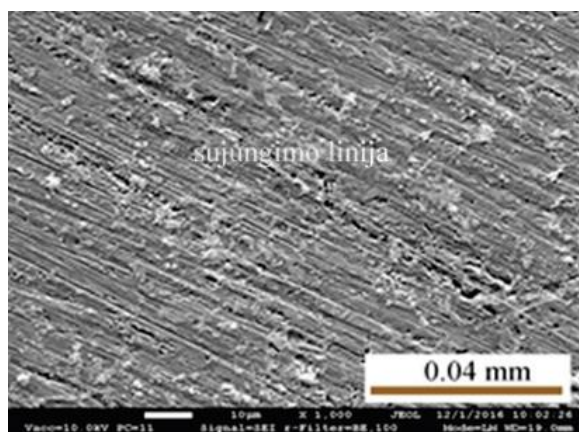
Iš gautų energijos dispersijos rentgeno spektroskopijos rezultatų matyti, kad jungties mikrostruktūra susideda iš vario matricos (kurioje yra ~97 % Cu) ir Nb dendritų (kur apie 85 % Nb) (3.19 pav.). Šios srities mikrostruktūra yra smulkesnė nei įprastai gaunama lėtai aušinant analogiškos sudėties Cu-Nb (20 masės % Nb) liejinius, pati jungties mikrostruktūra, fazinė sudėtis ir dendritų morfologija yra panaši.

3.4. Slėginis suvirinimas impulsiniu magnetiniu lauku

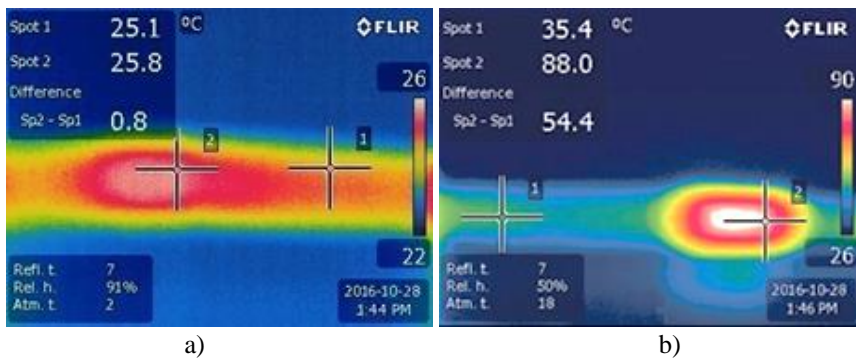
Cu-Nb mikrokompozitinių laidininkų jungtys buvo pagamintos taikant vario gilzės apipresavimą impulsiniu magnetiniu lauku. Šios jungties bendras vaizdas pateiktas 3.20 a paveiksle. Jungties išilginio ir skersinio pjūvių nuotraukose (3.20 b ir 3.20 c pav.) matyti, kad Cu gilzė buvo stipriai prispausta prie Cu-Nb laidininko ir jų paviršiai yra vientisai susijungę visoje kontaktinėje srityje. Kontaktinė sritis buvo analizuojama naudojant SEM mikroskopiją. 3.21 paveiksle matyti, kad gilzės ir laidininko kontakto linija sunkiai identifikuojama, šioje srityje nėra pastebima nepageidautinų nevientisumų. Suformuota neišardoma virintinė jungtis. Slėginio suvirinimo impulsiniu magnetiniu lauku jungčių elektrinės varžos matavimais nustatyta, kad 30 cm ilgio laidininko su slėginio suvirinimo jungtimi elektrinė varža yra didesnė, lyginant su tokio pat ilgio Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko varža (0,009 Ω). Tačiau elektrinės varžos padidėjimas iki 0,01 Ω nėra reikšmingas ir tai neviršija rekomenduojamos normos. Didžiausias elektrinės varžos skirtumas tarp laidininko ir bandinių su suvirinta jungtimi neviršijo 1,5 karto, o tai atitinka taikomus elektrokontaktinėms jungtims reikalavimus (GOST 17441, GOST 10434). Nepaisant to, elektrinės varžos skirtumas turėjo įtakos nevienodam Džaulio šilumos išsiskyrimui. Bandinių su suvirinimo jungtimi kaitinimo tekant elektros srovei rezultatai pademonstravo, kad termovizoriumi užfiksuotas temperatūros pasiskirstymas šio eksperimento pradžioje ir po 2 minučių kaitinimo tenkina reikalavimus elektrokontaktinėms jungtims (3.22 pav.). 54,4 °C siekiantis temperatūrų skirtumas jungtyje ir laidininke tekant elektros srovei neviršija leistino temperatūrų skirtumo (95 °C) (GOST 17441; GOST 10434).



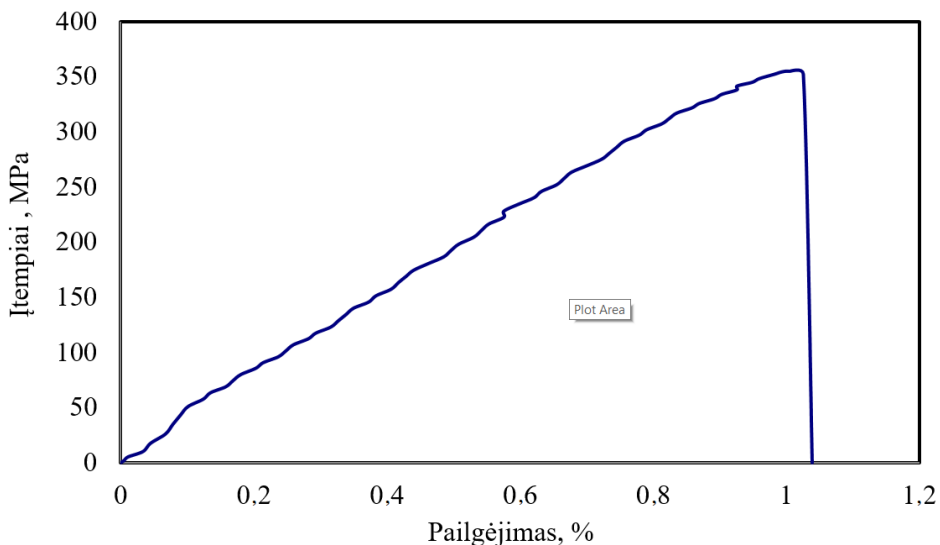
3.20 pav. Bendras Cu-Nb laidininkų suvirintos impulsiniu magnetiniu lauku jungties vaizdas: a) vaizdas iš priekio, b) jungties skerspjūvis; c) išilgas jungties pjūvis
Fig. 3.20. General view of the Cu-Nb joint formed by pulsed magnetic field pressing: a) front view, b) cross-section of joint; c) longitudinal section of joint



3.21 pav. Kontaktinė sritis tarp Cu-Nb mikrokompozito ir Cu apvalkalo
Fig. 3.21. The joint interface between Cu-Nb microcomposite and Cu sheath



3.22 pav. Temperatūros pasiskirstymas impulsiniu magnetiniu lauku suvirintoje jungtyje: a) prieš kaitinimą; b) po 2 min. kaitinimo 200 A srove; 1 ir 2 – matavimo taškai
Fig. 3.22. View of the temperature distribution in the joint welded by impulse magnetic field: a) before the heating; b) after 2 min of heating;
 1 and 2 – points where the measurements were made



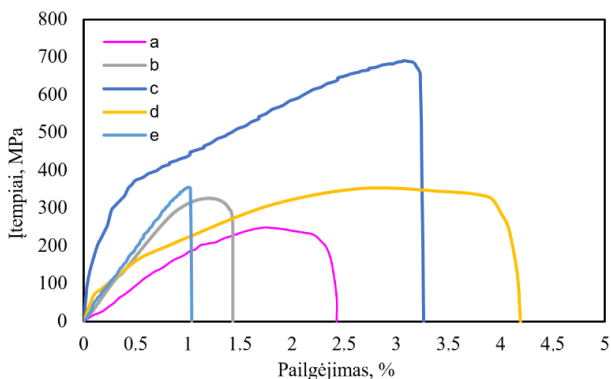
3.23 pav. Cu-Nb mikrokompozitinis laidininkas su suvirinimo impulsiniu magnetiniu lauku jungtimi (trūkio taškas – suvirinimo siūlė) įtempių-pailgėjimo kreivė
Fig. 3.23. Stress-strain curve of Cu-Nb wire with pulse magnetic field welding joint (break point – welding joint area)

Jungties tempimo bandymo rezultatais (3.23 pav.) nustatyta, kad Cu-Nb laidininko jungties stiprumo riba siekė 351 MPa, o pailgėjimas – 1,025 %. Gaunamas jungties stiprumas yra 30,4 % Cu-Nb laidininko stiprio.

Slėginio suvirinimo impulsiniu magnetiniu lauku technologija turi savo privalumų, nes šiuo atveju jungtys formuojamos kietoje būsenoje, kas sumažina mikrokompozito struktūros pažeidimo riziką ir su tuo susietų defektų kiekį.

3.5. Įvairiais suvirinimo būdais suvirintų jungčių pagrindinių charakteristikų palyginimas

Iš įvairiais suvirinimo metodais (termitinio, lazerinio, elektronpluoščio ir slėginio impulsiniu magnetiniu lauku suvirinimo) suvirintų jungčių mechaninių savybių palyginimo rezultatų matyti, kad nei vienos iš tirtų jungčių mechaninės savybės nėra geresnės nei mikrokompozitinio laidininko. Geriausiomis mechaninėmis savybėmis pasižymi termitinio suvirinimo jungtis, kurios stiprumo riba siekia 701 MPa (apie 62,5 % laidininko stiprio) ir santykinis pailgėjimas 3,2 % (apie 76,2 % laidininko pailgėjimo). Kitais suvirinimo būdais suvirintos jungtys turi ženkliai prastesnį nuo 2 iki 2,8 karto stiprumą nei termitinė jungtis. Daugumoje atvejų (išskyrus elektronpluoštį suvirinimą) suvirintų bandinių santykinis pailgėjimas taip pat yra mažesnis nuo 1,28 iki 3,1 karto lyginant su termitinės jungties santykinio pailgėjimo suirimo momentu (3.24 pav., 3.8 lentelė).



3.24 pav. Bandinių įtempių ir pailgėjimo kreivės: a) Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko bandinys suvirintas lazeriu su pridėtinu metalu; b) Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko bandinys suvirintas lazeriu be pridėtinio metalo; c) Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko bandinys suvirintas termitu; d) Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko bandinys suvirintas elektronų pluoštu; e) Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko bandinys suvirintas impulsiniu magnetiniu lauku;

Fig. 3.24. Stress-strain curves of samples: a) sample of laser welded joint with filler metal; b) sample of laser welded joint without filler metal; c) sample of thermite welding joint; d) sample of electron beam welding joint; e) sample of joint welded by pulse magnetic field

3.8 lentelė. Įvairiais būdais suvirintų jungčių ir laidininko mechaninių savybių palyginimas

Table 3.8. Comparison of wire and different welded joints mechanical properties

Bandinys	Stiprumo riba, MPa	Santykinis pailgėjimas, %
Cu-Nb laidininkas	1120	4,2
Termininis suvirinimas	701	3,2
Lazerinis suvirinimas su pridėtine medžiaga	250	2,5
Lazerinis suvirinimas be pridėtinės medžiagos	335	1,5
Elektronpluoštis suvirinimas	356	4,2
Slėginis suvirinimas impulsiniu magnetiniu lauku	351	1,025

Tuo tarpu visų suvirintų jungčių elektrinės savybės, išskyrus bandinį suvirintą impulsiniu magnetiniu lauku, buvo praktiškai vienodos. Visais atvejais laidininko ir jungčių elektrinių varžų skirtumas neviršija 1,1 karto, o maksimalus įkaitinimo temperatūrų skirtumas laidininke ir jungtyje 2 min praleidžiant 200 A elektros srovę neviršijo 54,4 °C (3.9 lentelė).

3.9 lentelė. Įvairiais būdais suvirintų jungčių elektrinių savybių palyginimas

Table 3.9. Comparison of different welded joint electrical properties

Suvirinimo būdas	Cu-Nb laidininko elektrinė varža, Ω	Jungties elektrinė varža, Ω	Laidininko ir jungties elektrinių varžų santykis	Laidininko ir jungties įkaitinimo temperatūrų skirtumas, °C
Termininis	0,01	0,011	1,1 karto	45,4
Lazerinis	0,01	0,011	1,1 karto	45,1
Elektronpluoštis	0,01	0,011	1,1 karto	47,7
Slėginis suvirinimas impulsiniu magnetiniu lauku	0,009	0,01	1,11 karto	54,4

Įvertinant tai, kad elektrokontaktinių jungčių elektrinė varža neturi skirtis nuo laidininko varžos daugiau nei 1,2 karto, jungties įkaitimo temperatūra eksploatacijos metu neturi skirtis nuo laidininko daugiau nei 95 °C ir tokios jungtys privalo atlaikyti ne mažesnes nei 30 % laidininko stiprumo ribos apkrovas, galima konstatuoti, kad visų tirtų virintinių jungčių mechaninės ir elektrinės savybės tenkina minimalius reikalavimus.

3.6. Trečio skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad taikant termitinį suvirinimą įmanoma sujungti Cu-Nb mikrokompozitinius laidininkus be visiško kompozitinio laidininko perlydymo. Sukurtas termitinio suvirinimo mišinys (Cu_2O , CuAl_2 , CaSi_2 , Sn ir CaF_2 pagrindu) užtikrina lengvą uždegimą ir aukštą apie 2470 °C termitinės reakcijos temperatūrą.
2. Termitinės reakcijos metu susiformavęs šlakas (anortitas) pasižymi puikiu atsiskyrimu nuo suvirinimo siūlės. Termitinės jungties sudėtyje gaunama apie 98 % Cu su nedideliu Sn ir Fe priemaišų kiekiu, o jungties mikrostruktūra sudaryta iš kietojo Cu tirpalo ir dispersinės Fe fazės.
3. Termitinės jungties elektrinių varžų skirtumas tarp laidininko ir siūlės tekant elektros srovei neviršija 1,1 karto, o termitinės jungtys gali atlaikyti apie 62 % laidininko tempimo apkrovos, jų stipris tempiant pasiekia apie 700 MPa, o santykinis pailgėjimas apie 3 %, t. y. apie 76 % laidininko santykinio pailgėjimo.
4. Nustatyta, kad taikant lazerinį suvirinimą įmanoma sujungti Cu-Nb mikrokompozitinius laidininkus taikant pridėtinę medžiagą ir be jos. 0,7 mm storio Cu-Nb laidininko suvirinimo Nd:YAG impulsiniu lazeriu procesas įmanomas varijuojant suvirinimo parametrus tik tam tikrame suvirinimo režimų diapazone, t.y. taikant nuo $3 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ iki $5,9 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ galios tankį ir ne mažesnę kaip 40 J impulso energiją.
5. Lazeriu suvirintos jungties su pridėtine medžiaga mechaninis stiprumas priklauso nuo panaudotos pridėtinės medžiagos ir yra praktiškai lygus šios medžiagos stiprumui tempiant (šiuo atveju apie 250 MPa). Cu-Nb laidininko autogeninės lazerinio suvirinimo jungtys pasižymėjo didesniu apie 330 MPa stipriu tempiant nei suvirinant su pridėtine medžiaga, bet tokios suvirintos jungtys yra nelanksios. Elektrinių varžų skirtumas tarp laidininko ir siūlės tekant elektros srovei neviršija 1,1 karto.
6. Nustatyta, kad taikant elektronpluoštį suvirinimą vakuume su nefokusuotu spinduliu įmanoma sujungti Cu-Nb mikrokompozitinį laidininką be pridėtinės medžiagos taikymo. Elektronpluoščio suvirinimo parametrų parinkimas ir varijavimas stipriai apribotas būtinybe palaikyti stabilią suvirinimo vonelės temperatūrą (apie 2470 °C).
7. Mažo galios tankio (apie $4,8 \cdot 10^3 \text{ W/cm}^2$) ir 5 mm skersmens elektronų pluošto dėmės taikymas leidžia sujungti 2,4 mm storio Cu-Nb laidininką, tačiau gaunamos jungties plotis yra didelis ir pasiekia 15 mm. Šiuo atveju perlydomas laidininko metalo tūris būna ženkliai didesnis nei kitais taikytais metodais, o jungties struktūra yra analogiška Cu-Nb (82 masės

- % Cu ir 18 masės % Nb) lydinio gaunamo krosnyje struktūrai be vidinių defektų, nevientisumų ir priemaišų.
8. Elektronpluoščio suvirinimo jungties stipris tempiant pasiekia apie 356 MPa, o santykinis pailgėjimas apie 4 %, t. y. apie 100 % laidininko santykinio pailgėjimo. Elektrinių varžų skirtumas tarp laidininko ir siūlės tekant elektros srovei neviršija 1,1 karto.
 9. Nustatyta, kad taikant slėginį suvirinimą impulsiniu magnetiniu lauku, įmanoma sujungti Cu-Nb mikrokompozitinį laidininką taikant jų galų apspaudimui plonasiene varinę gilzę. 2,4×4,2 mm skersmens Cu-Nb laidininkų sujungimas 6,8 kJ magnetiniu impulsu leidžia suformuoti vientisą presuotą jungtį.
 10. Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko suvirinimo jungtys impulsiniu magnetiniu lauku pasižymėjo apie 350 MPa stiprumu tempiant, tačiau šios jungtys praktiškai negali būti deformuojamos. Šių jungčių santykinis pailgėjimas nesiekia 1,025 %. Toks mažas jungties plastiškumas iš esmės yra sąlygotas jungties konstrukcijos standumu (taikomu dideliu užlaidos dydžiu) ir sujungiamų paviršių stiprios plastinės deformacijos metu susiformavusio metalinio ryšio tarp jų stiprumu. Elektrinių varžų skirtumas tarp laidininko ir siūlės tekant elektros srovei neviršija 1,11 karto.
 11. Nustatyta, kad Cu-Nb laidininkų jungčių elektrinės savybės išlieka stabilios ir praktiškai nekinta priklausomai nuo pasirinkto suvirinimo būdo, tai iš esmės apsprendžiama geru mikrokompozitinio laidininko Cu matricos ir taikytų pridėtinių medžiagų elektriniu laidumu. Jungčių mechaninės savybės skiriasi ir priklauso nuo taikomos suvirinimo technologijos ir medžiagų. Visų tirtų suvirintų jungčių, pagamintų taikant parinktus suvirinimo parametrus ir medžiagas, mechaninės ir elektrinės savybės tenkina minimalius keliamus elektrokontaktinėms jungtims reikalavimus, tačiau geresnėmis mechaninėmis bei elektrinėmis savybėmis pasižymi termitiniu suvirinimu sujungti Cu-Nb mikrokompozitiniai laidininkai.

Bendrosios išvados

1. Termitiniu suvirinimu gautos jungtys palyginus su kitais darbe naudotais metodais suvirintomis jungtimis pasižymi geriausiomis mechaninėmis ir elektrinėmis savybėmis. Sukurtas termito mišinys (82 % Cu_2O – 8,65 % CuAl_2 – 6,9 % CaSi_2 – 2,2 % Sn ir 0,25 % CaF_2) užtikrina lengvą uždegimą ir aukštą, apie 2470 °C termitinės reakcijos temperatūrą.
2. Termitinės reakcijos metu formuojasi šlakas – anortitas, kuris pasižymi puikiu atsiskyrimu nuo suvirinimo siūlės ir žema lydymosi temperatūra apie 1550 °C. Įvykus termitinei reakcijai jungties sudėtyje gaunama apie 98 % Cu su nedideliu Sn ir Fe priemaišų kiekiu, o Cu-Nb laidininkų jungties mikrostruktūra sudaryta iš kietojo Cu tirpalo ir dispersinės Fe fazės. Parinkta termitinės jungties geometrija ir gauta mikrostruktūra užtikrina artimą Cu-Nb laidininkui elektrinę varžą ir aukštą jungties stiprį tempiant, kuris siekia apie 700 MPa.
3. Nustatyti lazerinio suvirinimo parametrai ir medžiagos leidžia gauti priimtinos geometrijos suvirintą jungtį be suvirinimo defektų. Geriausios mechaninės ir elektrinės jungčių savybės pasiekiamos taikant tokius lazerinio suvirinimo parametrus: impulso energija 63 J, spinduliuotės galia 13 kW, impulso trukmė 5 ms, impulsų dažnis 6 Hz, lazerio dėmės skersmuo Ø0,06 cm, suvirinimo greitis 0,7 mm/s.

4. Autogeninio lazerinio suvirinimo jungties elektrinė varža yra artima Cu-Nb laidininkui, o stipris tempiant siekia apie 330 MPa dėl visame siūlės skerspjuvyje besiformuojančios dvifazės mikrostruktūros pagal savo cheminę sudėtį artimos Cu-Nb laidininkui. Suvirinant lazeriu jungties centrinės dalies sudėtis atitinka Cu-Nb mikrokompozitinio laidininko cheminę sudėtį, o mikrostruktūra sudaryta iš Cu matricos ir dispersiškų Nb globulių. Likusi suvirinimo siūlės dalis užpildoma pridėtinio metalo, kurio sudėtis priklauso nuo taikomos pridėtinės medžiagos.
5. Nustatyti elektronpluošio suvirinimo vakuume parametrai leidžia gauti pilno įvirinimo suvirinimo jungtį be suvirinimo defektų. Aukščiausios mechaninės ir elektrinės jungčių savybės pasiekiamos, kai taikomas galios tankis svyruoja nuo $4,8 \cdot 10^3$ iki $7,6 \cdot 10^3$ W/cm², o suvirinimo dėmės skersmuo 4–5 mm.
6. Elektronpluošio suvirinimo jungtyje gaunama dendritinė granuluota struktūra, kurioje dispersinių niobio dalelių ir dendritų buvimas vario matricoje sąlygoja geresnį virintinės jungties stiprį tempiant (apie 350 MPa), identišką Cu-Nb laidininkui plastiškumą (santykinis pailgėjimas apie 4 %) ir artimą Cu-Nb laidininkui jungties elektrinę varžą.
7. Nustatyti slėginio suvirinimo magnetiniu lauku parametrai leidžia gauti vientisą presuotą jungtį taikant Cu-Nb laidininkų apspaudimui plonasienę varinę gilzę, kurios cheminės sudėtis privalo būti identiška laidininko išoriniam paviršiui.
8. Geriausios mechaninės ir elektrinės jungčių savybės pasiekiamos, kai neišardomos jungties formavimas ir varinės gilzės deformavimas vyksta dideliu iki 100 m/s greičiu taikant didelės galios 6,8 kJ magnetinį impulsą. Presuotos jungties stipris tempiant gali siekti apie 350 MPa, jei taikomas užlaidos dydis viršija 20 mm. Tačiau dėl būtinybės taikyti didelio ilgio gilzės ir apriboto Cu atomų metalinio ryšio stiprumo šios jungtys praktiškai nesideformuoja (santykinis pailgėjimas nesiekia 1,025 %).

Literatūra ir šaltiniai

Akbari Mousavi S. A. A., Niknejad S. T. 2010. Study on the microstructure and mechanical properties of Nd:YAG pulsed laser beam weld of UNS-C17200 copper beryllium alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 210 1472–1481.

Angelov N. 2015. Determination of working intervals of power density for laser marking of 50 ChN steel. *Contemporary Materials*, VI–1.

Anisimov S. I., Imas Y. A., Romanov G. S., Khodyko Y. V. 1970. The effect of high-power laser radiation on metals. *Monography*. Moscow: Nauka 272.

ASM Handbook Volume 15, Casting 2008.

Ayoola W. A., Suder W. J., Williams S. W. 2017. Parameters controlling weld bead profile in conduction laser welding. *Journal of Materials Processing Tech.* 249 522–530.

Banasik M., Dworak J., Stano S. 2012. Laser welding with filler material in the form of a wire. *Welding International*, Vol. 26, Iss. 7, 516–520.

Belyi I. V., Fertik S. M., Khimenko L. T. 1978. Spravochnik po magnitno-impulsnoi obrabotke metallov. *Handbook on Magnetic-Pulse Metal Treatment*, Kharko: Vishcha shkola.

Benyounis K. Y., Olabi A. G., Hashmi M. S. J. 2005. Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile. *Journal of Materials Processing Technology* 164–165, 978–985.

Biro E., Weckman D. C., Zhou Y. 2002. Pulsed Nd:YAG Laser Welding of Copper Using Oxygenated Assist Gases. *Metallurgical and materials transactions A*, Volume 33A, July, 2019–2030.

Bono P., Metsios I., Blackburn J., Hilton P. 2013. Laser Processing of Copper and Aluminium Thin Sheets with Green (532nm) and Infrared (1064nm) Pulsed Laser Beam Sources. *Laser Conference Proceedings ICALEO*.

Burgardt P., Heiple C. P. 1992. *Welding Research Supplement*, 09, 341.

Castillejo M., Osii P. M., Zhigilej L. 2014. Lasers in materials science. Chapter 1. *Laser Physics for Materials Scientists*. Springer International Publishing, XVI, 387.

CEN ISO/TR 16060 Destructive tests on welds in metallic materials – Etchants for macroscopic and microscopic examination

Chen H. C., Bi G., Sharon Nai M. L., Wei J. 2015. Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper. *Journal of Materials Processing Technology*, Singapore: 216, 287–293.

Chomiakov M. V., Jacobson I. A. 1963. Thermite welding of multiwire conductors of power lines and substations. *Gosenergoizdat*, Moscow: 80.

Daurelio G., Giorleo G. 1991. Experimental techniques to cut and weld copper by laser – A review. *Materials and Manufacturing Processes*, Volume 6, Issue 4, 577–603.

Dilthey U., Fuest D., Scheller W. 1995. *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 27: 1181–1191.

Elmer J. W., Giedt W. H., Eagar T. W. 1990. *Welding Research Supplement*, 5, 168.

EN ISO 17639 Destructive tests on welds in metallic materials – Macroscopic and microscopic examination of welds.

EN 60512-1-1 Connectors for electronic equipment. Tests and measurements. Part 1-1: General examination. Test 1a: Visual examination.

EN 60512-2-1 Connectors for electronic equipment. Tests and measurements. Part 2-1: Electrical continuity and contact resistance tests. Test 2a: Contact resistance. Millivolt level method.

EN 60512-8-2 Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 8-2: Static load tests (fixed connectors) – Test 8b: Static load, axial.

EN 60512-9-2 Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 9-2: Endurance tests – Test 9b: Electrical load and temperature.

EN IEC 60512-15-2 Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 15-2: Connector tests (mechanical) – Test 15b: Insert retention in housing (axial).

EN 61788-6 Superconductivity – Part 6: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Cu/Nb-Ti composite superconductors.

EN 61788-21 Superconductivity – Part 21: Superconducting wires – Test methods for practical superconducting wires – General characteristics and guidance.

Enzinger N., Loidolt P., Wiednig C., Stutz M., Sommitsch C. 2016. Electron beam welding of thick-walled copper components. *Science Technology Welding and Joining*, 22, 127.

Franke P., Neuschütz D. 2005. Thermodynamic Properties of Inorganic Materials: Binary Systems. Part 3: Elements and Binary Systems from Cs–K to Mg–Zr. *Springer-Verlag*, Berlin: 309.

Frolov K.V. 2002. Mechanical Engineering. Encyclopedia. *Welding equipment*, Vol. 4–6, Machine Engineering, Moscow.

Gempel K. A. 1965. Reference Book of Rare Metals. *Mir*, Moscow.

Genc Oztoprak B., Akman E., Hanon M. M., Gunes M., Gumus S., Kacar E., Gundogdu O., Zeren M., Demir A. 2013. Laser welding of copper with stellite 6 powder and investigation using LIBS technique. *Optics & Laser Technology*, Volume 45, 748–755.

Giedth W. H., Talerico L. N. 1988. *Welding Research Supplement* 12, 299.

Gluchowski W., Stobrawa J., Rdzawski Z., Maszowski K. 2011. Microstructural characterization of high strength high conductivity Cu-Nb microcomposite wires. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, Vol. 46, Issue 1, 40–49.

Gluchowski W., Stobrawa J., Rdzawski Z., Maszowski K. 2014. Microstructure and properties of Cu-Nb wire composites. *Archives of metallurgy and materials*, Vol 59, Issue 1, 35–40.

GOST 6996 Welded joints. Methods of mechanical properties determination.

GOST 10434 Electric contact connections. Classification. General technical requirements.

GOST 17441 Electrical contact connections. Acceptance and methods of tests.

Grigorjanc A. G. 1989. Fundamentals of Laser Treatment of Materials. Moscow: Mashinostrojenie, 304.

Grigorjanc A. G., Shiganov I. N., Misiurov A. I. 2006. Technological processes of laser treatment. Moscow: MGTU, 664.

Hashimoto T., Matsuda F., Trans. 1967. National Research Institute, Metals 9, 48.

Hashimoto K., Sato T., Niwa K. 1991. Laser Welding Copper and Copper Alloys. *Journal of Laser Applications* 3, 21.

Heidera A., Weber R., Herrmann D., Herzog P., Graf T. 2015. Power modulation to stabilize laser welding of copper. *Journal of Laser Applications*, Vol. 27/2.

Herlach F., Miura N. 2003. High Magnetic Fields. Magnet Technology and Experimental Techniques. *Science and Technology*, Vol. 1. London: Imperial College Press. 336.

- Herrmann D., Herzog P. 2013. Laser welding of copper. *Industrial Laser Solutions*, Vol. 1/1.
- Hess A., Schuster R., Heider A., Weber R., Graf T. 2011. Continuous Wave Laser Welding of Copper with Combined Beams at Wavelengths of 1030 nm and of 515 nm. *Physics Procedia* 12, 88–94.
- Hicken K., Giedt W. H., Bentley A. E. 1991. Welding Research Supplement, 3, 69.
- Hitz B., Ewing J. J., Hetch J. 2001. Introduction to laser technology. 3rd edition. *IEEE Press*, New York: 287.
- Hong S. I. 2000. *Journal Material Research*, 15, 1889.
- Isincev O. E. 2004. Copper and Copper Alloys. Native and Foreign Marks. *Reference Book, Machine Engineering*, Moscow.
- ISO 4136 Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test.
- ISO 11699-1 Non-destructive testing – Industrial radiographic film Classification of film systems for industrial radiography.
- ISO 17636-1 Non-destructive testing of welds – Radiographic testing X- and gamma-ray techniques with film.
- ISO 19232-1 Non-destructive testing – Image quality of radiographs Determination of the image quality value using wire-type image quality indicators.
- Jayanthi A., Venkataramanan K., Suresh Kumar K. 2016. Laser beams. A novel tool for welding: A review. *IOSR Journal of applied physics*, Vol. 8/6, 8–26.
- Johnson L. D. 1970. Welding Research Supplement, 02, 55.
- Jokar M., Ghaini F. M., Torkamany M. J. 2013. Influence of Shielding Gas Composition on Weld Structure in Pulsed Nd:YAG Laser Welding. *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 3, 35–42.
- Katayama S. 2013. Handbook of laser welding technologies. Developments in laser microwelding technology. *Woodhead Publishing Limited*, 654.
- Katayama S. 2015. Handbook of laser welding technologies. Moscow: Technosfera 704.
- Kershenbaum V. J. 1993. International Translator of Modern Steels and Alloys. *Science and Technology*, Vol. 3, Moscow.
- Khokhlovsky A. S., Martynov V. N., Sysoev A. G. 2011. MPEI Vestnik, 5, 52.
- Kindo K. 2006. New pulsed magnets for 100 T, long-pulse and diffraction measurements. *Journal of Physics*, 51, 522–528.
- Krishna S. C., Gangwar N. K., Jha A. K., Pant B. J. 2013. Materials 1–6.
- Kurnakov N. S. 1960. Selected works. Vol. 1. Academy of Science USSR, Moscow, 595.
- Kurnakov N. S. 1961. Selected works. Vol. 2. Academy of Science USSR, Moscow, 611.
- Kurnakov N. S. 1963. Selected works. Vol. 3, Academy of Science USSR, Moscow.

- Квасницкий, В. В. 2003. Специальные способы сварки. *Учебное пособие* Издво, Николаев: УДМУТ, 437.
- Leprince-Wang Y., Han K., Huang Y., Yu-Zhang K. 2003. Microstructure of Cu-Nb microcomposites. *Material science and engineering*, 351, 214–223.
- Maak P. Y. Y. 1984. Electron Beam Welding of Thick-Walled Copper Containers for Nuclear Fuel Waste Disposal Phase Two A, Report Nr. 84–57-K, Ontario Hydro.
- Maak P. Y. Y. 1985. Electron Beam Welding of Thick-Walled Copper Containers for Nuclear Fuel Waste Disposal Phase Three A, Report Nr. 85–100-K, Ontario Hydro.
- Maltsev M. D. 1970. Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys. *Metallurgy*, Moscow: 178.
- Martienssen W., Warlimont H. 2006. Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data. *Springer Science & Business Media*, 1121.
- Miyachi A. 2016. Laser welding fundamentals. America Inc.
- Morar A., Laszlo D. Acta. 2007. Electroteh. 48, 38.
- Munitz A., Bamberger M., Venkert A., Landau P., Abbaschian R. 2006. *Journal Material Science*, 44, 64.
- Munteanu A., Nagit G. 2009. Presented at 1st International Conference on Manufacturing Engineering. *Quality and Production Systems MEQAPS '09*, Transilvania University of Brasov, Romania, 24–26 September, 484–488.
- Murzin S. P., Artjushina V. I. 2006. Formation of Welded Connection by Pulse Laser Radiation with Adjustable Spatial Distribution of capacity. *Laser equipment and technology*, the Samara Scientific Center News. Nr. 2, 441–444.
- Nedoseka A. 2012. Fundamentals of Evaluation and Diagnostics of Welded Structures. *Woodhead Publishing*, 639.
- Oguro H., Avaji S., Watanabe K., Sugimoto M. 2013. New fabrication process of Cu-Nb composite for internal reinforcement of Nb₃Sn wires. *Journal Superconduction*, Vol. 26, 2099–2101
- Parfenov V. A. 2011. Laser micromachining of materials: textbook. *Publishing House of the ETU*, 59.
- Pilarczyk J., Weglowski M. S. 2014. Inst. Weld. Bull., 5, 80.
- Raabe D., Heringhaus F., Hangen U., Gottstein G. 1995. International Journal Material Research 86, 405.
- RD 24.949.04-90, RF State Research Centre JSC “RPA” “CNIITMASH”, Moscow: 1990.
- Rdzawski Z., Gluchowski W., Stobrawa J., Kempinski W., Andrzejewski B. 2015. Microstructure and properties of Cu-Nb and Cu-Ag nanofiber composites. *Archives of civil and mechanical engineering*, Vol. 15, 689–697.

- Reisgen U., Olschok S., Turner C. 2017. Welding of thick plate copper with laser beam welding under vacuum. *Journal of Laser Applications*, Vol. 29, Number 2.
- Rikalina N. N., Zuev I. V., Uglov A. A. 1978. Principles of Electron Beam Treatment of Materials. *Machine Engineering*, Moscow.
- Sandstrom D. J., Buchen J. F., Hanks G. S. 1970. *Welding Research Supplement*, 7, 293.
- Shikov A. K., Pantsyrnyi V., Vorobeva A., Sudev S., Khlebova N., Silajev A., Belyakov N. 2002. Copper-niobium high strength and high conductivity winding wires for pulsed magnets. *Material science and Heat Treatment*, Vol. 44, Nos. 11–12, 491–495.
- Schwartz M. M. 2003. Brazing, 2nd Edition, *ASM International*, Ohio, 421.
- Shneerson G. A., Dolotenko M. I., Krivosheev S. I. 2006. Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. *De Gruyter Studies in Mathematical Physics*, 147–178.
- Sinko R. J. 1992. Presented at International Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, USA, 787–791.
- Slavinskij M. P. 1952. Physical-Chemical Properties of Elements, *Metallurgizdat*, Moscow.
- Sorbom B. N., Ball J., Palmer T. R., Mangiarotti F. J., Sierchio J. M., Bonoli P., Kasten C., Sutherland D. A., Barnard H. S., Haakonsen C. B., Goh J., Sung C., Whyte D. G. 2015. ARC: A compact, high-field, fusion nuclear science facility and demonstration power plant with demountable magnets. *Fusion Engineering and Design*, Volume 100, 378–405.
- Spahn E., Löffler M., Balevičius S. 2011. European laboratories for Pulsed power research. *Journal of Korean physical society*, Vol. 59, Nr. 6, 3594–3598.
- Spitzig W. A., Klotz P. D. 1987. Scripta. Metallurgical Materials, 1143.
- Steen W. M., Mazumder J. 2010. Laser Material Processing. *Springer-Verlag*, London.
- Sun Z., Ion J. C. 1995. Review: Laser welding of dissimilar metal combinations. *Journal of Materials Science*, 30, 4205–4214.
- Sun Z., Salminen A. S. 1997. Current Status of Laser Welding with Wire Feed. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 12, No. 5, 759–777.
- Suzuki O., Sakamoto K., Imanaka Y., Kido G. 2001. Fabrication of Pulsed Magnets With a Linear-Type Coil-Winding Machine. *Physica B*, 294–295: 661–664.
- Takacs L. 2002. Self-sustaining reactions induced by ball milling. *Progress in Materials Science*, Vol. 47, 335–414.
- Tesanovic Z. 2013. High magnetic field science and its application in the US: current status and future directions. *National academies press of sciences*, 10.
- Tzeng Y. F. 2000. Process Characterisation of Pulsed Nd:YAG Laser Seam Welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 10–18.
- Veiko V. P., Shahno E. A. 2014. Laser technology in problems and examples. *Textbook. Publishing House of the University „ITMO“*, 88.

Višniakov N., Novickij J., Ščekaturovienė D., Šukšta M. 2006. Mechanical Properties of Winding Conductors Affected by Cyclic Thermal Overloads. *Solid State Phenomena*, Vol. 113, 541–544.

Višniakov N., Novickij J., Ščekaturovienė D., Petrauskas A. 2011. Quality Analysis of Welded and Soldered Joints of Cu-Nb Microcomposite Wires. *Materials Science*, Vol. 17(1), 16–19.

Walsh C. 2002. Laser Welding – Literature review. *Materials Science and Metallurgy Department*, University of Cambridge, England.

Xue X., Pereira A. B., Amorim J., Liao J. 2017. Effects of Pulsed Nd:YAG Laser Welding Parameters on Penetration and Microstructure Characterization of a DP1000 Steel Butt Joint. *Metals*, 7, 292.

Zhou Y. N. 2008. Microjoining and nanojoining, *Woodhead publishing Limited*, 345–417.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Višniakov, N.; Mikalauskas G.; Černašėjus O.; Škamat J. 2019. Laser welding of copper-niobium microcomposite wires for pulsed power applications = Laserstrahlschweißen von Mikro-Verbundwerkstoffen aus Kupfer und Niob zum Einsatz in der Hochspannungsimpulstechnik, *Material science and engineering technology = Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Special issue: Advanced Computational Engineering and Experimenting (ACE-X 2018)*. 646–662. ISSN 0933-5137 (Clarivate Analytics Web of Science).

Višniakov, N.; Mikalauskas, G.; Černašėjienė, R.; Černašėjus, O.; Škamat, J. 2018. Electron beam welding of copper-niobium microcomposites for pulsed power applications = Elektronenstrahlschweißen von Mikro-Verbundwerkstoffen aus Kupfer und Niob zum Einsatz in der Hochspannungsimpulstechnik, *Materials science & engineering technology = Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Special issue: Advanced Computational Engineering and Experimenting (ACE-X 2017)*. 538–550. ISSN 0933-5137 (Clarivate Analytics Web of Science).

Višniakov, N.; Mikalauskas, G.; Černašėjienė, R.; Škamat, J.; Černašėjus, O.; Novickij, V. 2018. Feasibility evaluation of Cu-Nb microcomposite joints formed by magnetic field pressing for pulsed power applications, *Technical Gazette = Tehnicki vjesnik*. 326–329. ISSN 1330-3651 (Clarivate Analytics Web of Science).

Višniakov, N.; Mikalauskas, G.; Škamat, J.; Černašėjienė, R.; Černašėjus, O.; Rudzinskas, V.; Boris, R. 2017. Thermite welding of Cu-Nb microcomposite wires, *International Journal of Materials Research*. 832–839. ISSN 1862-5282 (Clarivate Analytics Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

Mikalauskas, G.; Višniakov, N.; Lukauskaitė, R.; Škamat, J. 2016. Mikrokompozitinių Cu-Nb laidininkų ypatumų ir jų sujungimo galimybių analizė, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba = Science – future of Lithuania: Mechanics, material science, industrial engineering and management*. Vilnius: Technika, 609–614. ISSN 2029-2341.

Mikalauskas, G.; Višniakov, N.; Lukauskaitė, R.; Škamat, J.; Černašėjus, O. 2016. Соединение микрокомпозитных Cu-Nb проводников способом электронно-лучевой сварки, *Современные электрохимические технологии и оборудование: материалы международной научно-технической конференции*. Минск: БГТУ, 237–241. ISBN 9789855305706.

Mikalauskas, G.; Višniakov, N.; Kvasnitsky, V.; Strelenko, N. 2018. Микрокомпозитные Cu-Nb проводники и возможности их неразъемного соединения = Microcomposite Cu-Nb conductors and the possibilities of their indirectable connection, *Технологические системы*. Киев: Индустриальные технологии. 56–63. ISSN 2074-0603.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Strong magnetic field systems are widely used in fundamental and applied research in various disciplines and industries. Tokomacs, stellarators, superconducting magnets, the Large Hadron Collider (LHC) in the CERN laboratory, the ITER reactor, levitation systems are some of the best known examples of such magnetic systems. The most important component of all these magnetic systems is the inductor (solenoid). The record magnetic field already reaches 100 T. Improving the design of solenoids is no longer enough to create such a strong magnetic field. Traditional electrotechnical materials and conductors used in solenoids can no longer withstand high mechanical and thermal loads, so they are being replaced by completely new composite materials, including Cu-Nb microcomposite conductors. These conductors have a unique structure, excellent mechanical properties and good electrical conductivity. But one of the important unresolved problems in strong magnetic field systems remains research and development of reliable non-destructive joints and their reliable joining technologies, whereas most such magnet designs must be non-destructive after their operation.

The relevance of the thesis

Systems with strong magnetic fields have many electrocontact connections. When installing such equipment and its components, it becomes necessary to connect the conductors to each other, to connect the wires to other electrical components. The

connections must also be due to the limited bending capacity of the microcomposite conductors and the modular or sectional structure of the magnetic solenoids. The connections of the conductors of the magnetic coil sections or their terminals shall not be the weakest point of the solenoids. All contact connectors are subject to strict technical requirements, including their construction, electrical parameters, mechanical properties and reliability. Electrical conductor connections can be disassembled or non-destructive. Screwed or soldered connections are not reliable in this case, as they break down and have poorer mechanical and electrical characteristics under operating loads. Therefore, non-destructive welded joints are much more promising, as most such magnet constructions and conductor joints have to be very reliable and non-disassembled after their operation.

The study of the weldability and welded joint characteristics of microcomposite Cu-Nb conductors will provide new knowledge about the specifics of welding of conductors, the structure of joints and the properties of welded joints. This will improve the mechanical properties of such complex and important products, reduce the cost of production and increase the resource life of the joints.

The object of the research

Microcomposite Cu-Nb conductor and non-destructive joints made by thermite, laser, electron-beam and pulsed power methods.

The aim of the thesis

To determine the influence of Cu-Nb conductor welding methods and their parameters on the microstructure, mechanical and electrical properties of the obtained welded joints.

The objectives of the thesis

In order to achieve the objective of the work necessary to solve the following tasks:

1. To study the peculiarities of the structure and properties of Cu-Nb conductors that affect welding;
2. To examine the technical and operating conditions of technical systems where Cu-Nb conductors are used, which determine the performance of welded joints;
3. To select rational welding technologies of Cu-Nb conductors, to calculate or select preliminary welding technological parameters;
4. Develop or select the necessary additives to obtain technologically high-quality and reliable non-destructive joints;
5. Perform connection of Cu-Nb conductors by different welding methods using selected welding parameters and materials;
6. To prepare the research methodology of welded joints and to evaluate the quality and structure of the obtained welded joints, the most important operational (electrical and strength) properties;
7. Compare the properties of welded joints obtained in different ways and select the most promising joining technology;
8. To optimize the composition, technological parameters and joint geometry of the most promising welding method of choice.

Research methodology

The dissertation uses analytical and experimental research methods. Samples of Cu-Nb conductors were joined by various special methods (thermite welding, laser welding, electron beam welding, pressure welding with a strong magnetic field). The structure of the joints were evaluated using various modern research methods: scanning electron microscopy, X-ray microanalysis, X-ray diffraction. Welded joints quality were determined using digital X-ray non-destructive testing. The properties of the welded joints were evaluated by mechanical and electrical tests.

Scientific novelty of the thesis

Scientific interest in the new generation of microcomposite conductors has only been growing recently. Many scientific publications have been published on the microstructure of microcomposite Cu-Nb conductors, their properties and application in practice, in solenoids of various constructions. However, there is very little in-depth scientific study and information on the joining of these microcomposite conductors and the properties and structure of these joints. With the growing market interest in Cu-Nb microcomposite conductors, the scale of their industrial production, the expansion of commercial applications, the need to study and obtain important results on the weldability of such conductors and the physical and mechanical properties of these joints become very relevant. In the course of experimental research and preparation of the dissertation, new knowledge about the weldability of Cu-Nb conductors and properties of welded joints was obtained, the most important parameters of laser, electron beam and welding with strong magnetic fields were determined, a recipe for a thermite mixture allowing to ensure good mechanical and electrical properties of the electrocontact joints.

The practical value of the research findings

The results of the work are important in solving the production and reliability of existing and developing pulsed magnetic systems, industrial induction systems, next-generation levitation vehicles and modern Cu-Nb conductors for high-voltage power lines. The results of the research allow to select and apply the most rational, technologically simple and most convenient in practice Cu-Nb conductors non-destructive joining technology, to select and optimize welding parameters, to predict the main performance characteristics of welded joints.

The results of experimental research confirm that the proposed joining technologies are suitable for use in the joining of electrocontact connections of Cu-Nb conductors of pulsed magnetic systems. The joining technologies and materials used can be selected taking into account the operating conditions of the joints, the availability of these connections, the required mechanical and electrical properties of the joints.

The defended statements

1. The developed (82% Cu₂O – 8.65% CuAl₂ – 6.9% CaSi₂ – 2.2% Sn – 0.25% CaF₂) composition thermite mixture allows high-quality welding of Cu-Nb conductors without remelting, ensuring high up to 701 MPa joint strength,

good electrical conductivity and a small electrical resistance difference of up to 1.1 times between the conductor and the connector, as well as maintaining a rational composition of slag (anorthite) and its excellent separation from the weld.

2. The mechanical and electrical properties of Cu-Nb microcomposite conductors welded by thermite, laser, electron beam and pressure welding meet the minimum requirements for electrocontact connections, but Cu-Nb microcomposite conductors with thermite welded joints has higher rationality and better mechanical and electrical properties.

The approval of the research findings

7 scientific papers on the subject of the dissertation were published: four of them appeared in publications of other international database; one of them – in publications of other international database; two of them in other reviewed database. The results of the research described in the dissertation were presented at nine scientific conferences in Lithuania and abroad.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters and general conclusions. The work consists of 104 pages, excluding annexes, 23 numbered formulas, 42 figures and 18 tables were used in the text. 107 literature sources were used in writing the dissertation.

1. The analysis high magnetic field systems constructions, microcomposite conductors and peculiarities of welding processes

Materials for production of 5–100 T magnetic field generating solenoid windings shall be strong (strength above 750 MPa) and conductive to electric current (electric conductivity above 60–70% IACS). High strength is necessary to withstand huge Lorentz powers, and a good electric conductivity – to minimize heating of conductors due to high electric current passing through these conductors. These materials also must have sufficient plasticity to prevent breaking of conductors and cracking during winding of windings of inductors (Gluchovski *et al.* 2011.). Currently four types of composite conductors are generally used in pulse magnetic inductors: Cu-Nb and Cu-Ag, microcomposites GlidCop, macrocomposite CuSS (Shneerson *et al.* 2006). Cu-Nb microcomposites currently are the best conductors among the analogous ones, featuring exceptional strength and conductivity. Their strength is equal to 1100–1500 MPa (compared to the conventional Cu conductor – 270 MPa), yield stress – 850 MPa, electric conductivity – 67–70% IACS. Therefore Cu-Nb microcomposites are considered one of the most promising and suitable materials from the currently existing ones for pulse systems with strong magnetic fields.

The structure of Cu-Nb microcomposite conductors is made of copper matrix with embedded very thin niobium threads. Nb threads strengthen the copper matrix, ensure higher conductor strength and do not obstruct movement of electrons, i.e., flow of electric current (Shikov *et al.* 2002).

2. Copper-niobium microcomposite conductors non-destructive joining methodology, test methods and materials used in the work

As an object of the research the 2.4×4.2 mm and 1.7×0.8 mm Cu-Nb microcomposite wire, formed by „assembly-deformation“ method has been used. Mechanical properties of this Cu-Nb wire: R_e – 830–850 MPa, R_m – 1120 MPa, elongation A – 4.2%. The copper-niobium microcomposite containing 18–20% by weight of niobium was found to have optimal electrical and mechanical properties. Reducing the niobium content loses the mechanical strength of the conductor, and increasing the niobium content loses the elasticity of the wires and decreases the electrical conductivity. The structure of this microcomposite is Nb fillers <15 nm and the copper matrix is shown in Fig. S2.1.

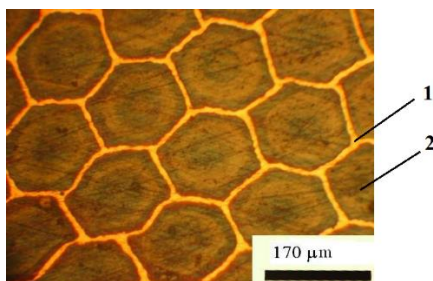


Fig. S2.1. Microstructure of Cu-Nb microcomposite conductor:
1 – Cu matrix, 2 – Nb fibres (Višniakov *et al.* 2011)

A special graphite mold was made for the thermite welding (with intermediate casting) of the butt joint of Cu-Nb microcomposite conductors, the general view of which is shown in Fig. S2.2.



Fig. S2.2. View of the opened graphite mound

The composition of the thermite mixture was selected in accordance with known thermite mixtures for copper alloys and the particularity of the Cu-Nb microcomposite structure. Along with the oxidizer (CuO and/or Cu_2O) and fuel (Al), the thermite mixture

for copper alloys often contains CaSi_2 (normally, more than 5% of the total mass). The combination of CaSi_2 and Al (as fuel) at molar ratios from 0.25:1 to 16:1 ensures that during the exothermal reaction of the mixture a high temperature will be reached and the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--SiO}_2$ slag system will form.

The following welding parameters were used for laser welding to obtain butt welded samples from both sides: single-pulse energy 63 J, peak power 13 kW, pulse width 5 ms, pulse frequency 6 Hz, laser spot size $\varnothing 0.06$ cm, welding speed 0.7 mm/s, part-to-part gap ~ 0.02 cm.

The welding was done without filler material (autogenous) and using CuSn_1 laser-welding wire of $\varnothing 0.3$ mm diameter. A 45° angle between the beam and the wire for welding with filler material was used. The $\varnothing 0.3$ mm laser-welding wire 2.1006 (CuSi_1) was used for microcomposite conductors laser welding with filler material. This filler material has better mechanical strength than pure Cu wire due to the combined effect of all the alloying elements that are in the mixture. The electrical conductivity of this filler material is equal to Cu-Nb microcomposite wire, which is very important for electrical connections. The melting point of CuSn_1 is similar to the Cu matrix of Cu-Nb microcomposite. Therefore, the filler metal will melt when it is added to the weld pool and create a more homogeneous weld after the crystallization stage.

The samples were clamped in a standard welding fixture. The fixture was mounted on a 3D stage, which provided motion of the workpiece relative to a stationary laser beam.

For the measurements of electrical resistance, three fragments of Cu-Nb wire with butt joints were prepared. Each sample was 30 cm long. The experiments were done according to the methodology explained in the standards. The electrical resistance was measured using a U2810D Digital LCR Meter Tester. The Joule heating of the samples was observed with a Flir-E49001 thermal imaging camera. The samples were heated electrically with 60 A using a welding rectifier VDU-305. The temperature distribution at the beginning of the experiment and after every 30 seconds was registered.

The magnetic pressing of the Cu-Nb has been performed using an experimental pulsed power setup, which consisted of high voltage (5.5 kV) pulsed power (6.8 kJ) discharge unit and the inductor for the sample. The schematic of the inductor for magnetic pressing technology and the sample positioning is shown in Fig. S.2.3.

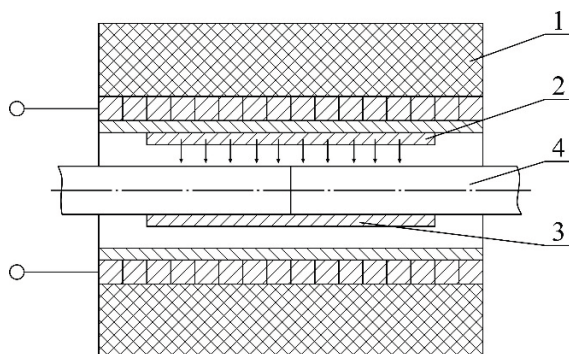


Fig. S.2.3. Schematic of the magnetic pressing technology, where: 1 – inductor; 2 – tubular sheath for pressing; 3 – tubular sheath after pressing; 4 – conductors, which are being connected

The capacitor of the pulsed power setup (450 μF) has been controllably discharged through the inductor. The control of the discharge time and the pulsed current allowed controlling the process of pressing (i.e. applied energy) for precise formation of the joint. The pressing has been performed using radial pressing of the thin-walled tubular sheath (copper tube) on the co-axial junction of the microcomposite conductors. The induction of the pulsed magnetic field inside the inductor for magnetic pressing triggered fast deformation (up to 100 m/s) of the copper tube around the conductors, which allowed forming a strong and tight connection of two conductors.

3. Investigation of properties and analysis of structure of welded joints of copper-niobium microcomposite conductors

General view of thermite welding butt joints is shown in Fig. S3.1. The image shows that Cu-Nb microcomposite conductor ends are welded by applying thermite mixture (Fig. S3.1 a). Thermite welded joint shape repeats the geometry of graphite shape, welded joint dimensions $10 \times 12 \times 18$ mm (after removal of slag). Cross-section of welding seam is about ~ 100 mm². No unacceptable macro defects (gaps, pores, inserts etc.) were detected in the seam cross-section (Fig. S3.1 b). Also it shows that the conductor composite structure and the shape is not damaged.

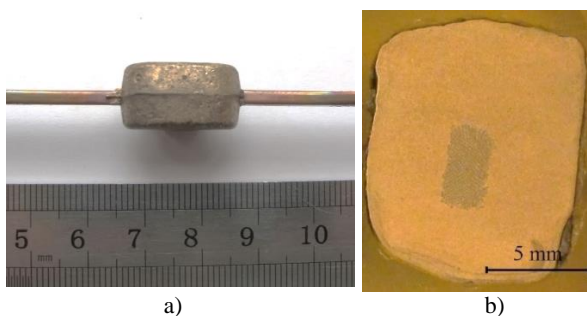


Fig. S3.1. Thermite welded joint of Cu-Nb microcomposite conductor: a) general view; b) the cross-section of the joint

After thermite mixture reaction ~ 76 wt.% of Cu and ~ 24 wt.% of slag was generated. Slag composition with respect to XRD analysis results (Fig. S3.2) complies with CaO–Al₂O₃–SiO₂ system. Diffraction curve provides easily identified CaO, SiO₂, Al₂O₃ and CaAl₂Si₂O₈. It confirms that during thermite reaction the crystalline-amorphous slag (anorthite) with melt point of 1550 °C is formed.

Thermite welded joint microstructure is provided in Fig. S3.3. Fig. S3.3 shows that thermite joint is solid and there are no flaws in the butt joint area.

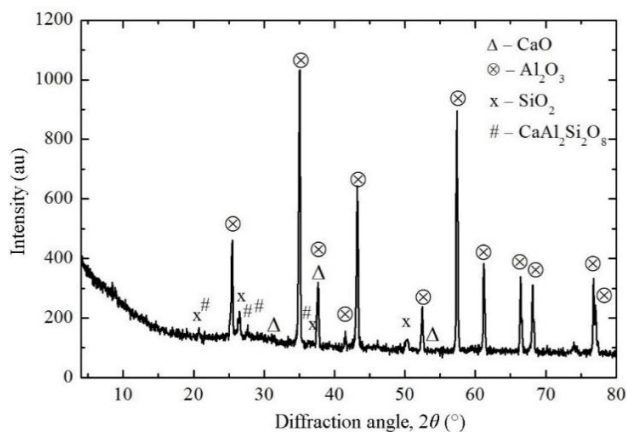


Fig. S3.2. Slag XRD curve

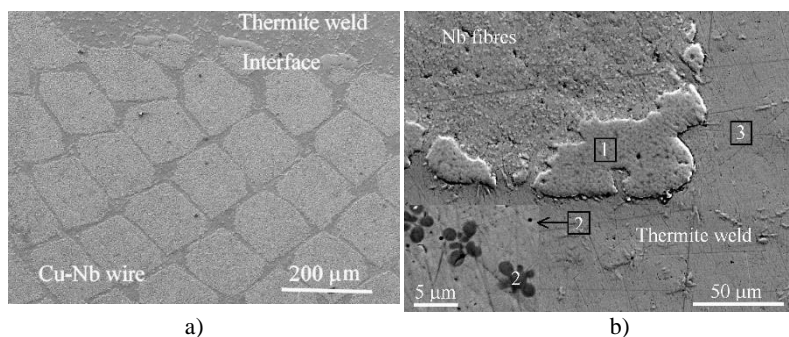


Fig. S3.3. Cross-section of the thermite joint: a) microstructure near the conductor and fusion line; b) magnified microstructure with marked EDS areas (SEM image)

Conductor microstructure is surrounded by Cu alloy (marked “thermite joint” Fig. S3.3 a and Fig. S3.3 b.), which has crystallized from liquid state after exothermic thermite reaction. In the thermite joint cross-section (Fig. S3.1 b and Fig. S3.3) we see that the Cu-Nb conductor itself was not fused. Its shape and microstructure remained practically intact. It means that connection of conductors was executed at a very high welding speed. During microscopic analysis of joint cross-section on the Cu-Nb conductor surface no thin copper membrane was noticed. It suggests that it has fused and mixed with thermite joint metal during welding. Fused areas in the butt joint area (zone No. 1 Fig. S2.3 b) prove that only surface layers of the conductor and its copper shell had fused. Based on zone No. 1 EDS results, it is Nb phase, which could form due to fusing of separate Nb threads on the conductor shell. It means that thermite reaction temperature exceeds Nb melt point (2469 °C). In addition to Nb these fused areas also contained ~14% Cu, ~5% Fe and ~3.2% other elements. Whereas Cu and Nb solubility in solid state is very low, these fused regions are mainly made of two phases – Cu and Nb.

The highest strength of copper alloys can be enough accurately determined based on Vickers hardness, using a simple linear dependency $R_m = 3.353 \text{ HV}$ (Krishna *et al.* 2013). The measured metal hardness of the thermite welded joint was from 91 to 96 HV. Based on this, the calculated strength of the welded joint based on hardness is in the range from 305 to 322 MPa. That is 39–46% more that can be expected from pure copper.

The highest tensioning stresses in the sample with thermite joint were equal to 701 MPa, and this is equal to 62.5% of microcomposite conductor tension strength. Sample relative elongation after crack was equal to 3.2% (or 76.2% of microcomposite conductor elongation). During tensile test the samples cracked in the main metal of Cu-Nb microcomposite conductor next to welded joint. It means that stress concentration can have a significant effect on joint strength. Also it means that cross-section of weld seam can be reduced by maintaining the same joint strength. In order to assess the strength of smaller diameter thermite welded joints by experiment two additional series of welded samples with 35 mm² and 70 mm² joint cross-sections were prepared. After completion of additional tensile tests it was determined that the reached maximum loads, stress-deformation curves and crack properties in the same place are identical to the results of the first experiment (when joint cross-section was 100 mm²). Based on these results 35 mm² cross-section is sufficient to prevent joint disintegration in the welded joint. However to ensure reliability of the joints, usually a factor of safety is introduced, which for welded joints usually is from 1.4 to 1.6 times (Nedoseka 2012). Respectively, the optimal thermite welded joint cross-section can be ~50 mm².

Joint electrical resistance measurements showed that electrical resistance of 30 cm long conductor with thermite joint has slightly increased compared to the same length conductor resistance at room temperature (0.01 Ω). The measured electrical resistance of conductor with thermite joint was equal to 0.011 Ω . Such difference in electrical resistance does not exceed 1.2 times, which is recommended for thermite joints (Chomiakov *et al.* 1963).

The quality of joints was assessed by executing radiographic tests. The received joint digital radiographic images and welded joint cross-section (Fig. S3.4 and Fig. S3.5) show that when using laser welding with filler material and without it, quality welded joints are made without unacceptable internal defects (cracks, bad fusion, bad welding, porosity, inserts and other dangerous non-integrities). It shows that in both welding cases Cu-Nb conductor edges were fused lightly, but it was a very thin layer necessary for filling of gaps between the edges with a liquid metal.

When welding with a filler metal it is possible to see two different compositions and microstructure areas (Fig. S3.4). The middle part of weld seam (zone 2) is made of copper (~84 wt.%) and niobium (~16 wt.%), i.e., the composition is proportional to the chemical composition of Cu-Nb microcomposite conductor. It means that this welded joint area has formed due to Cu-Nb conductor fusion. It is clear from distribution of Cu and Nb elements (Fig. S3.4 e, Fig. S3.4 f) that microstructure of welding area 2 is made of Cu matrix and dispersive Nb phase (globules).

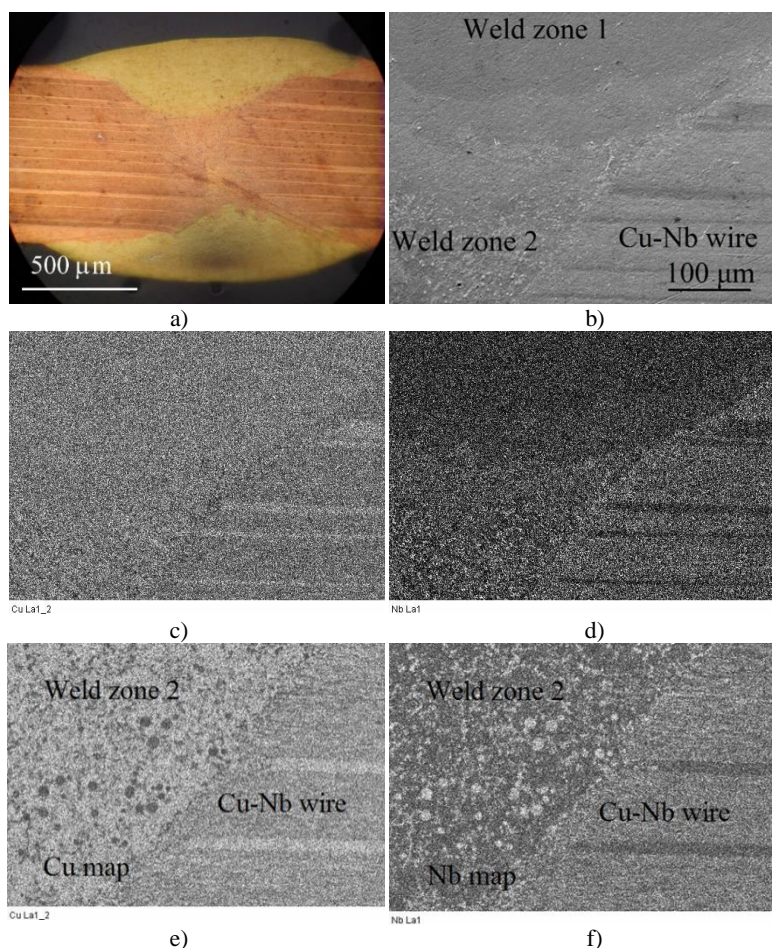


Fig. S3.4. The structure of the joint welded with filler metal: a) longitudinal section of the joint; b) magnified SEM image of the microstructure near the interface between wire and weld; c) distribution of Cu element in welding area no. 1; d) distribution of element Nb in welding area no. 1; e) distribution of Cu element in welding area no. 2; f) distribution of Nb element in welding area no. 2

Whereas Cu and Nb is almost insoluble in solid state, in this case Cu and Nb mechanical mixture is formed. This structure is characteristic to microstructure of Cu-Nb alloys. The size of niobium fibres is very small (compared to Cu-Nb microstructure after usual casting) – from the tenth or hundredth micrometer to several micrometers. It can increase the strength of weld seam. The composition of external welded joint part (zone 1, Fig. S3.4 b) is ~97 wt.% copper, amount of other elements does not exceed 3%. It shows that this seam area has formed due to fusion of filler materials.

In case of welding without a filler metal (Fig. S3.5) a more uniform microstructure and chemical composition in the entire cross-section of welded joint is formed. Elemental composition of weld seam slightly differs from the initial Cu-Nb microcomposite

conductor composition. Joint microstructure is made of two phases: Cu matrix and dispersive Nb phase. Intense mixing happening in weld pool during laser welding has influence on a uniform distribution of Nb particles in Cu matrix (Fig. S3.5 c and Fig. S3.5 d).

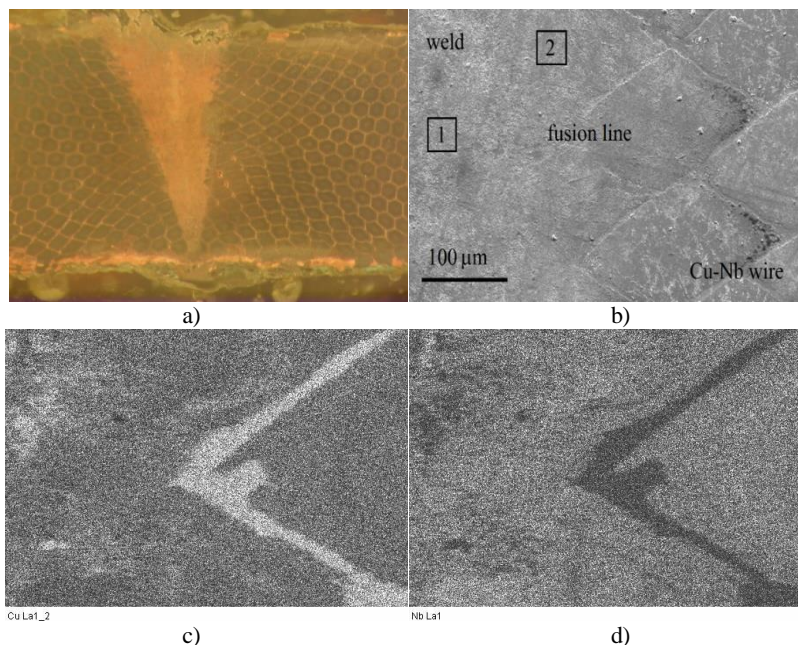


Fig. S3.5. The structure of the joint welded without filling material (autogenous welding): a) laser penetration depth after welding on one side; b) magnified SEM image of the microstructure near the interface between wire and weld; 1 and 2 – marked EDS areas; c) distribution of Cu element in weld area and fusion line; d) distribution of Nb element in weld area and fusion line

Electrical resistance measurements of laser joints showed that electrical resistance of 30 cm long conductor with laser welded joint is higher compared to resistance of the conductor (0.01Ω) of the same length. However the difference of electrical resistance is negligible (up to 1.1 times) and it does not exceed the recommended value. The largest electrical resistance difference between the conductor and samples with welded joint cannot exceed 1.5 times (GOST 10434).

Tensile tests of samples with welded joints showed that all laser welded joints break at the fusion line. The joint welded with a filler metal withstood about 340 N tensile load.

Respectively, stresses in welded joint areas reached 250 MPa, and this corresponds to about 22.3% of Cu-Nb microcomposite conductor strength limit. Relative elongation of the sample with this joint at the moment of disintegration was about 2.5%. This is about 59.5% from relative elongation value reached by microcomposite conductor. The joint welded without a filler metal withstood about 456 N tensile load. Stresses at the moment

of disintegration reached 335 MPa, this corresponds to 30% of Cu-Nb microcomposite conductor strength limit. Relative elongation of sample with such a joint at the moment of disintegration was equal only to 1.5%. This is about 35.7% from relative elongation value of microcomposite conductor.

Welding mode with defocused radius were performer for electron beam welding, which usually is applied to thin products, was used in experiments. In this case the width of welded joint must exceed 5.2 mm. Joint width by applying the indicated parameters was equal to 14–15 mm.

The results of radiographic and longitudinal section microscopic analysis showed that the gained welded joints do not contain dangerous welding defects. The transition diagram of two-component system shows that copper and niobium has a very limited melting in each other. Niobium can melt in up to 1% liquid copper at 1090 °C temperature. Copper mainly melts in about 1.5% niobium at 1093 °C temperature (Pilarczyk *et al.* 2014, Sinko 1992). A large difference between melt points ($T_{\text{Cu}} = 1083$ °C, $T_{\text{Nb}} = 2465$ °C) of these elements is the main reason due to which dendritic granulated structure is gained in Cu-Nb alloys or welded joint. Grain morphology essentially is determined by fusion conditions during welding (Raabe *et al.* 1995).

The structure of electron-beam welded joint without filler material contains copper matrix and niobium dendrites Fig. S3.6.

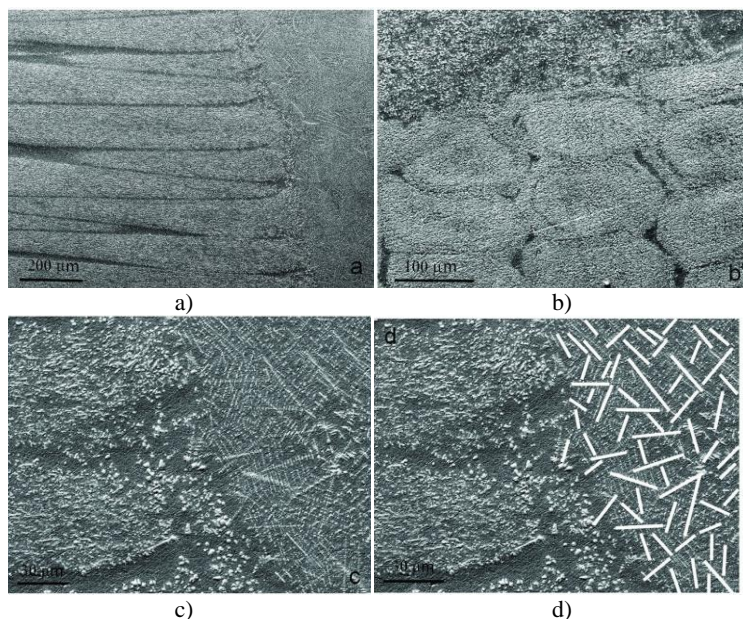


Fig. S3.6. Secondary electron images of electron beam welding joints: a) longitudinal section of joint; b) cross section of joint; c) fusion area; d) niobium dendrites morphology

This microstructure is analogous to Cu-Nb alloy (82 wt.% Cu and 18 wt.% Nb) structure gained in melting kiln. However, microstructure gained with electron-beam

welding is superior compared to other welding methods, because in this case welding is performed in vacuum thus majority of welding defects are avoided. Presence of dispersive niobium particles and dendrites in copper matrix has effect on better strength of welded joint (Sinko 1992).

Electrical resistance measurements of electron-beam welded joints showed that electrical resistance of 30 cm long conductor with electron-beam welded joint is higher compared to resistance of the conductor of the same length. A measured electrical resistance value of a sample with welded joint was about $0.011\ \Omega$. Electrical resistance difference is about 1.1 times, so it does not exceed the recommended value based on GOST 10434 and GOST 17441 requirements. The largest electrical resistance difference between the conductor and samples with welded joint cannot exceed 1.5 times.

After joint tensile test it was determined that strength limit of electron-beam welded joint is equal to 356 MPa (31.8% of microcomposite conductor strength). Relative elongation of welded sample at the moment of disintegration was about 4.2% (102.4% of microcomposite wire elongation). Actually it is the same as Cu-Nb microcomposite conductor relative elongation, which is about 3.3–4.1% (Višniakov *et al.* 2006).

Microstructure test results suggest that better joint mechanical properties are reached due to fine grain microstructure resulting during welding. It is known that copper alloy yield stress and strength limits change proportionately based on grain size. Fine 7–50 μm Nb dendrites (Fig. S3.7) have formed in weld seam zone.

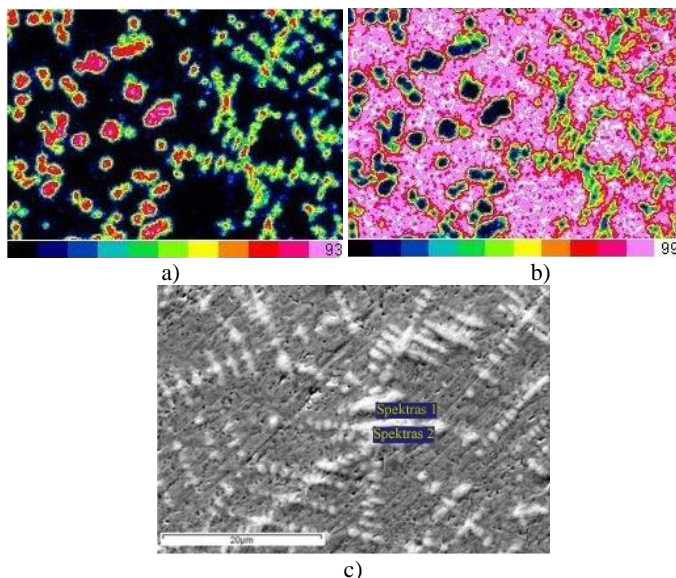


Fig. S3.7. Energy-dispersive X-ray analysis results: a) quantitative X-ray map of niobium, b) quantitative X-ray map of copper, c) point analysis of niobium dendrites

These dendrites have evenly distributed in the copper matrix and are oriented along the welded conductor axis, i.e., in the weld pool the metal has crystalized in the heat

transfer and draw-off direction. Energy dispersion radiographic spectroscopy analysis showed that joint microstructure is composed of copper matrix (containing ~97% Cu) and Nb dendrites (containing about 85% Nb) (Fig. S3.7).

Microstructure in this area is smaller compared to the one usually gained through slow cooling of analogous composition Cu-Nb (20 wt.% Nb) alloys, the joint microstructure, phase composition and morphology of dendrites is similar (Munitz *et al.* 2009).

Joints of Cu-Nb microcomposite conductors were made by applying copper sleeve pressing with pulse magnetic field. The images of joint longitudinal and cross-sections (Fig. S3.8 a and Fig. S3.8 b) show that Cu sleeve was heavily pressed against Cu-Nb conductor and their surfaces are solidly connected along the entire contact area. The contact area was analysed using SEM microscopy.

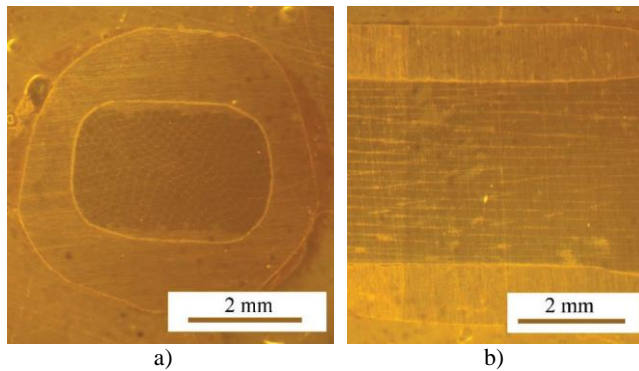


Fig. S3.8. General view of the Cu-Nb joint formed by pulsed magnetic field pressing: a) front view, b) cross-section of joint; c) longitudinal section of joint

The image (Fig. S3.9) shows that the contact line of sleeve and conductor is hard to identify, in this area no undesirable non-integrities were noticed. It proves that non-destructible welded joint has formed.

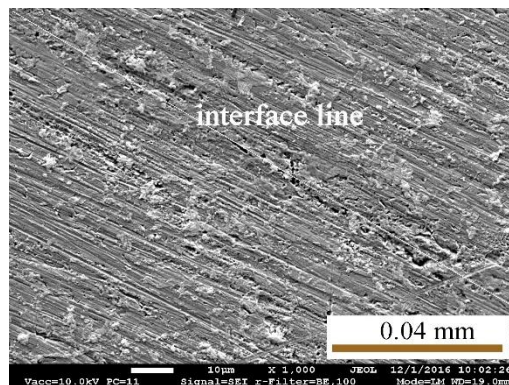


Fig. S3.9. The joint interface between Cu-Nb microcomposite and Cu sheath

Electrical resistance measurements of pressure welding with pulse magnetic field joints showed that electrical resistance of 30 cm long conductor with pressure welded joint is higher compared to resistance of the conductor (0.009Ω) of the same length. However the increase of electrical resistance up to 0.01Ω is negligible and it does not exceed the recommended value. The largest electrical resistance difference between the conductor and samples with welded joint did not exceed 1.5 times, and this meets the requirements applicable to electrocontact joints (GOST 17441, GOST 10434). Despite this, electrical resistance difference had impact on uneven emission of Joule heat.

Joint tensile test results showed, that Cu-Nb conductor joint strength limit was 351 MPa, and elongation – 1.025%. The resulting joint strength is 30.4% of Cu-Nb conductor strength. Despite this, pressure welding with pulse magnetic field technology has some advantages, because in this case the joints are formed in solid state and it reduces the risk of damage of microcomposite structure and related number of defects.

General conclusions

1. Thermite welded joints have the best mechanical and electrical properties compared to other welded joints used in the work. The developed thermite mixture (82% Cu_2O – 8.65% CuAl_2 – 6.9% CaSi_2 – 2.2% Sn and 0.25% CaF_2) ensures easy ignition and high thermal reaction temperature, about 2470 °C.
2. During the thermite reaction, slag is formed – anorthite, which is characterized by excellent separation from the weld seam and a low melting point of about 1550 °C. The thermite reaction yields about 98% Cu with a small amount of Sn and Fe impurities, and the microstructure of the Cu-Nb conductor bond consists of a solid Cu solution and a dispersed Fe phase. The selected thermite joint geometry and the obtained microstructure ensure electrical resistance close to the Cu-Nb conductor and high tensile strength of the connection, which reaches about 700 MPa.
3. The selected laser welding parameters and materials allow to obtain a welded joint of acceptable geometry without unacceptable welding defects. The highest mechanical and electrical properties of the joints are achieved by applying the following laser welding parameters: pulse energy 63 J, radiated power 13 kW, pulse duration 5 ms, pulse frequency 6 Hz, laser spot diameter $\varnothing 0.06$ cm, welding speed 0.7 mm/s.
4. The electrical resistance of the autogenous laser welding joint is close to the Cu-Nb conductor, and the tensile strength is about 330 MPa, due to the two-phase microstructure formed in the entire cross-section of the seam, which is close to the Cu-Nb conductor in terms of its chemical composition. Laser welding with filler metal results in a heterogeneous seam structure. The composition of the central part of the bond corresponds to the chemical composition of the Cu-Nb microcomposite conductor, and the microstructure consists of a Cu matrix and dispersed Nb globules. The rest of the weld is filled with an filler metal, the composition of which depends on the applied additive. When the CuSn1 added wire is used, the outer region contains about 97% by weight of copper, the content of other elements does not exceed 3%, and the microstructure of this region is single-phase. For this reason, the tensile strength of the welded joint is even lower and does not exceed 250 MPa, but the joint has a better (about 2.5%) relative elongation.

5. The selected parameters of electron beam welding in vacuum allow to obtain a full welded joint without unacceptable welding defects. The highest mechanical and electrical properties of the joints was achieved when the applied power density ranges from $4.8 \cdot 10^3$ to $7.6 \cdot 10^3$ W/cm² and the welding spot diameter is 4–5 mm.
6. The electron beam welding joint produces a dendritic granular structure in which the presence of dispersed niobium particles and dendrites in the copper matrix results in better tensile strength of the welded joint (about 350 MPa), plasticity identical to Cu-Nb conductor (relative elongation about 4%) and Cu-Nb resistance.
7. The selected parameters of pressure welding by a magnetic field allow to obtain a seamless press joining by applying a thin-walled copper sleeve for the compression of Cu-Nb conductors, the chemical composition of which must be identical to the outer surface of the conductor.
8. The best mechanical and electrical properties of the obtained joints are achieved when the formation of the permanent joint and the deformation of the copper sleeve takes place at a high speed of up to 100 m/s using a high-power 6.8 kJ magnetic pulse. The tensile strength of the press joint can be around 350 MP if the applicable overlap size exceeds 20 mm. However, due to the need for a long length sleeve and the limited metallic bond strength of the Cu atoms, these joints are practically not deformed (relative elongation less than 1.025%). Due to the application of the Cu sleeve and the good electrical conductivity of this metal, the electrical resistance of the magnetic field welding joint is close to that of the Cu-Nb conductor.

Priedai¹

A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija

B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo disertacijoje

C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Gediminas MIKALAUSKAS

STIPRIŲ MAGNETINIŲ LAUKŲ SISTEMOMS TAIKOMŲ
MIKROKOMPOZITINIŲ VARIO IR NIOBIO LAIDININKŲ
SUVIRINAMUMO IR SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (T 008)

INVESTIGATION OF WELDED JOINTS AND WELDABILITY OF
MICROCOMPOSITE COPPER-NIOBIUM CONDUCTORS
FOR THE APPLICATION IN HIGH MAGNETIC FIELD SYSTEMS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (T 008)

2020.07.23. 10,25 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius